

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE CIENCIAS  
INSTITUTO DE CIENCIAS AMBIENTALES Y ECOLÓGICAS  
POSTGRADO EN ECOLOGÍA TROPICAL

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS AGROECOSISTÉMICO Y MODELIZACIÓN DEL CRECIMIENTO Y DEL  
BALANCE DE AGUA Y NITRÓGENO DEL CULTIVO DE PLÁTANO**

Trabajo presentado ante la Universidad de  
Los Andes como requisito parcial para optar  
al grado de Doctor en Ecología Tropical

**Ing. Carlos Gómez**

Tutora:

Dra. Lina Sarmiento

Co-Tutor:

Dr. Dimas Acevedo

JURADO:

Dra. Michele Ataroff

Dra. Magdiel Ablan

Dr. Vianel Rodríguez

Dr. Daniel Machado

MÉRIDA – VENEZUELA  
Noviembre 2015

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

Este trabajo de investigación fue financiado con recursos propios del autor y el apoyo institucional referente a personal, infraestructura y equipos de la Estación Local Chama adscrita al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), el Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE) adscrito a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes (ULA), Universidad Sur del Lago "Jesús María Semprúm" (UNESUR) proyecto N° 025-C-2011 y a la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET).

C.C.Reconocimiento

## **Agradecimientos**

A Dios por enviarme a recorrer este camino.

Desde que inicie este trabajo ha pasado mucho tiempo, han ocurrido muchas cosas y la superación de cada proceso y obstáculo para que esta tesis pasara de ser una idea a una realidad, me acompañaron muchas personas, que participaron directa o indirectamente, por lo que mencionarlas a todas es tarea imposible, por lo que quiero que reciban todo mi agradecimiento y además pido disculpas si alguna no se encuentra en este listado incompleto.

A Gregoria Pérez Silva, quien me arrastro a iniciar este camino.

Fundamentalmente a mi Tutora, la Dra. Lina Sarmiento y Tutor el Dr. Dimas Acevedo, por sus orientaciones, creatividad, esfuerzo y paciencia, por brindarme sus experiencias, conocimientos y amistad que influyeron en mi formación profesional.

A Joel Vera y Joel Cañas, por la ayuda, sacrificio y esfuerzo impartido desde la creación e instalación de todos los dispositivos y a lo largo de todo el proceso de evaluación de campo, sin poner reparo en el día o la hora que tocara hacerlo.

A todo el personal de INIA-Zulia-Chama especialmente a Norelys Pino, José Barriga, Adriana Moya, Raisa Rumbos, German Sotelo, Maritza Parada, Irma Patiño, Víctor Santos, José Contreras, Marvellys Peña (INSAI), por el esfuerzo brindado durante el arduo trabajo durante los muestreos destructivos de las plantas, las mediciones, logística, muchas veces poco comunes a su trabajo, como juntar agua después de cada lluvia y por su voluntad para hacerlo a cualquier día que se antojara llover.

A todo el personal de CORPOZULIA por el apoyo brindado.

Al personal contratado Luis Morales, Ignacio Vera, Lía Valery, Humberto Molina y El equipo de lavadores de raíces Wisneida Matta, Adriana Mercado, Osleily Vide, Daniela Molina, Jackson Pernía, Ali Fernández por su dedicación, paciencia y esfuerzo durante este proceso.

A Iraima Chacón, Henry Ramírez, Manuel Alfonso y José David, por la ayuda y apoyo dado.

Al personal del ICAE, Francis Guillén, Jhonny Márquez, Williams Dugarte, Idalba y Nancy, muy especialmente a Zulay Méndez por la dedicación y apoyo brindado en el trabajo realizado en Mérida.

Al personal del Laboratorio de suelos de UNESUR

A Juan Carlos Motamayor, Guiliana Mustica, Alexis Valery, Rossana Timaure por el apoyo brindado.

A los jurados Michele Ataroff, Magdiel Ablan, Vianel Rodríguez y Daniel Machado, por tomarse el trabajo de leer y brindar importantes aportes y sugerencias.

Por último, pero no menos importante agradezco a mis padres María Antonia y Juan, mis hermanos Alberto y Luis y toda mi familia por el apoyo brindado.

***Dedicatoria***

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

*A mi familia*

*(María Antonia, Juan, Alberto, Luis, Chela, Maruja, Carmen (†) y...)*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, MARCO CONCEPTUAL, ANTECEDENTES, PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
<b>I.1. Introducción</b>	<b>4</b>
I.1.1. Retos de la investigación agronómica para una agricultura sustentable	4
I.1.2. Importancia social y económica de la producción de musáceas	7
I.1.3. El manejo del nitrógeno y sus consecuencias ambientales.	9
<b>I.2. Marco conceptual y antecedentes</b>	<b>11</b>
I.2.1. El enfoque agroecosistémico	11
I.2.2. Balance hídrico del agroecosistema	13
I.2.3. Balance de nitrógeno del agroecosistema	18
I.2.4. Modelos de simulación de cultivos y experiencias en musáceas	24
I.2.4.1. Los modelos de simulación y su aplicación en la agricultura	24
I.2.4.2. Modelado de la producción de los cultivos	26
I.2.4.3. Balance hídrico	28
I.2.4.4. Balance de nitrógeno	29
I.2.4.5. Modelos de simulación en musáceas	30
<b>I.3. El cultivo de plátano como sistema de estudio</b>	<b>32</b>
I.3.1. Descripción de la planta y sus órganos	32
I.3.2. Características del crecimiento de la planta y su análisis	37
I.3.2.1. Dinámica de crecimiento	37
I.3.2.2. Dinámica de acumulación de nitrógeno	42
I.3.3. Características del sistema de manejo del cultivo del plátano en el Sur del Lago de Maracaibo.	44
<b>I.4. Planteamiento del problema, preguntas de investigación y objetivos</b>	<b>47</b>
<b>CAPÍTULO II. MARCO GENERAL METODOLÓGICO</b>	<b>53</b>
<b>II.1. Área de estudio</b>	<b>53</b>
II.1.1. Ubicación	53
II.1.2. Características generales de la Estación Local Chama	53
II.1.3. Características del lote seleccionado	57
<b>II.2. Diseño agronómico y mediciones para la dinámica de crecimiento y absorción de nitrógeno</b>	<b>66</b>
II.2.1. Diseño agronómico	66
II.2.2. Dinámica de crecimiento	66
<b>II.3. Balance hídrico</b>	<b>74</b>
II.3.1. Esquema para el cálculo del balance hídrico	74
II.3.2. Entradas de agua	75
II.3.3. Transferencias y almacenamiento de agua	75
II.3.4. Salidas de agua	78
II.3.5. Determinación de nitrógeno en los flujos de agua	81

<b>II.4. Balance de nitrógeno</b>	83
II.4.1. Esquema para el cálculo del balance de nitrógeno	83
II.4.2. Dinámica de nitrógeno en el suelo	84
II.4.3. Cálculo de las pérdidas de nitrógeno por volatilización	86
II.4.4. Cálculo del nitrógeno perdido por erosión	88
II.4.5. Cálculo del balance de nitrógeno	88
<b>II.5. Manejo del cultivo</b>	90
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS</b>	92
<b>III.1. Dinámica de la fitomasa</b>	92
III.1.1. Compartimientos de fitomasa de la planta madre	94
III.1.2. Compartimientos de la planta hijo	98
III.1.3. Distribución entre los órganos de la fitomasa de la planta madre, el hijo y la unidad de producción	102
III.1.3.1. Análisis de la distribución vertical y horizontal de la fitomasa radical	103
III.1.4. Relación entre biomasa aérea y fitomasa subterránea (BA/FS)	104
III.1.5. Tasa de crecimiento absoluto y tasa de retranslocación de asimilados	106
III.1.6. Dinámica del nitrógeno en la planta madre, en el hijo y en la unidad de producción	107
III.1.6.1. Concentración de nitrógeno	107
III.1.6.2. Acumulación y distribución de nitrógeno en las plantas	111
III.1.6.3. Distribución entre los órganos de la planta madre, el hijo y la unidad de producción	115
III.1.7. Tasa de acumulación y tasa de retranslocación de nitrógeno	117
III.1.8. Relación carbono/nitrógeno (C/N) de la planta madre, el hijo y nieto	119
III.1.9. Curva de dilución de nitrógeno	121
III.1.10. Índice de nutrición de nitrógeno (INN)	122
III.1.11. Índice de área foliar, radiación fotosintéticamente activa interceptada y eficiencia del uso de la luz	123
<b>III.2. Balance hídrico del agroecosistema plátano</b>	126
III.2.1. Dinámica hídrica mensual	126
III.2.2. Relación entre la precipitación y los flujos considerados	129
III.2.3. Distribución espacial del flujo de goteo+caída directa	130
III.2.4. Agua almacenada del suelo	134
III.2.5. Balance hídrico del período estudiado	134
<b>III.3. Flujos y balance de nitrógeno</b>	136
III.3.1. Dinámica del nitrógeno mineral del suelo	136
III.3.2. Dinámica del nitrógeno en los flujos hídricos	137
III.3.3. Pérdidas de nitrógeno por erosión	141
III.3.4. Pérdidas de nitrógeno por volatilización	143
III.3.5. Balance de nitrógeno	144
III.3.6. Flujos de mineralización-inmovilización.	148
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	149
<b>IV.1. Dinámica de la fitomasa y su contenido de nitrógeno en relación con las etapas de crecimiento del plátano Hartón</b>	149

IV.1.1. Dinámica de la fitomasa del plátano Hartón	151
IV.1.2. Etapas de crecimiento	154
IV.1.2.1. Etapa de crecimiento vegetativo	154
IV.1.2.2. Etapa reproductiva	155
IV.1.2.3. Etapa productiva	156
IV.1.3. Análisis de la distribución de la fitomasa radical	158
IV.1.4. Dinámica del nitrógeno en la planta madre, el hijo y la unidad de producción	161
<b>IV.2. Balance hídrico del agroecosistema plátano</b>	166
IV.2.1. Dinámica hídrica mensual	167
IV.2.2. Balance hídrico del agroecosistema plátano	171
IV.2.3. Comentario sobre las metodologías utilizadas y perspectivas	173
<b>IV.3. Ciclado de nitrógeno del agroecosistema plátano</b>	174
IV.3.1. Características del balance de nitrógeno del agroecosistema plátano y su comparación con otros agroecosistemas	175
IV.3.1.1. Las transformaciones que sufre la composición química del agua a medida que atraviesa el agroecosistema	175
IV.3.1.2. Absorción de nitrógeno por parte del cultivo	178
IV.3.1.3. Pérdidas de nitrógeno por volatilización	179
IV.3.1.4. Pérdidas de suelo y nitrógeno por erosión	180
IV.3.1.5. Balance de nitrógeno	181
IV.3.2. Aspectos considerados para la modelización	182
IV.3.3. Posibles consecuencias ambientales para el Lago de Maracaibo	183
IV.3.4. Manejo agronómico del agroecosistema plátano relacionado con el nitrógeno y la eficiencia de su uso	183
<b>CAPÍTULO V. MODELO DE SIMULACIÓN DEL AGROECOSISTEMA PLÁTANO</b>	185
<b>V.1. Introducción</b>	185
<b>V.2. Descripción del modelo de simulación del agroecosistema plátano</b>	187
V.2.1. Simulación de la producción primaria neta potencial y real	188
V.2.2. Submodelo de crecimiento de la planta madre de plátano	191
V.2.3. Submodelo de crecimiento de la planta hijo del plátano	196
V.2.4. Submodelo de balance de nitrógeno	199
V.2.5. Submodelo de descomposición	204
V.2.6. Submodelo de balance hídrico	211
V.2.7. Submodelo de transpiración, evaporación desde el suelo e intercepción	216
<b>V.3. Análisis estadísticos del modelo</b>	219
<b>V.4. Calibración del modelo</b>	220
V.4.1. Búsqueda en la bibliografía	220
V.4.2. Calibración automática	220
V.4.3. Calibración manual	221
V.4.3.1. Submodelo planta	221
V.4.3.2. Submodelos de nitrógeno, evapotranspiración e intercepción	226
<b>V.5. Información de entrada y datos para la calibración</b>	226

<b>V.6. Resultados de la simulación con el modelo calibrado</b>	227
V.6.1. Producción real y potencial y funciones de respuesta	227
V.6.2. Submodelos de planta madre y planta hijo	229
V.6.3. Submodelo de balance hídrico	233
V.6.4. Submodelo de nitrógeno	235
V.6.5. Submodelo de descomposición	238
<b>V.7. Discusión</b>	239
V.7.1. Producción real y potencial	239
V.7.2. Submodelos de planta madre y planta hijo	244
V.7.3. Submodelo de balance hídrico	246
V.7.4. Submodelo de nitrógeno	247
V.7.5. Submodelo de descomposición	248
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	250
<b>VI.1. Conclusiones</b>	250
<b>VI.2. Recomendaciones</b>	256
<b>Referencias</b>	258
<b>ANEXOS</b>	274
<b>Capítulo III</b>	274
<b>Capítulo V</b>	279

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO I

Tabla I-1. Balance de N ( $\text{KgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) de dos variedades de caña de azúcar en Venezuela. López-Hernández <i>et al.</i> (2005)	22
Tabla I-2. Balance de N ( $\text{KgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) en caña de azúcar bajo dos sistemas de drenaje en México. Estrada <i>et al.</i> (2005)	23
Tabla I-3. Balance de nitrógeno mineral ( $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) en banano. Thieuleux, (2006)	24
Tabla I-4. Descripción de las etapas de crecimiento en plátano Dominico Hartón (Aristizábal y Jaramillo, 2010)	42

### CAPÍTULO II

Tabla II-1. Promedio mensual de humedad relativa del aire durante el período 2001-2003 en la Estación Local Chama – INIA-Zulia	56
Tabla II-2. Promedio, máximo y mínimo de la velocidad del viento en la Estación Local Chama-INIA-Zulia. Años 2001-2003 (2 m)	56
Tabla II-3: Descripción del perfil de suelo en una calicata realizada para la caracterización de la parcela experimental	60
Tabla II-4. Distribución porcentual de las raíces de una planta de plátano Hartón en estado de prefloración, Estación Local Chama, INIA-Zulia	63
Tabla II-5. Análisis de suelo de la parcela experimental	65
Tabla II-6. Muestreos considerados en el crecimiento de la planta de plátano, etapas fenológicas y número de compartimientos muestreados para la madre, los hijos y los nietos.	67
Tabla II-7. Resumen de los parámetros evaluados en cada compartimiento o proceso con respecto a la concentración de nitrógeno	84

### CAPÍTULO III

Tabla III-1. Etapas y fases de crecimiento, estados fenológicos, períodos de evaluación y total de fitomasa de la unidad de producción	93
Tabla III-2. Fitomasa promedio de la planta madre por compartimiento ( $\text{gMS} \cdot \text{m}^{-2}$ ), en los distintos estados fenológicos. Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los estados fenológicos. $n=3$ plantas para S, PE y H3 y $n=6$ para el resto	94
Tabla III-3. Biomasa del racimo de la planta madre por compartimiento ( $\text{gMS} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas a $p < 0,05$ .	97
Tabla III-4. Necromasa aérea acumulada de la planta madre por compartimiento ( $\text{gMS} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre muestreos a $p < 0,05$	98
Tabla III-5. Fitomasa promedio de la planta hijo por compartimiento ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Se incluye al nieto en un solo compartimiento. Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas a $p < 0,05$	100

Tabla III-6. Necromasa de la planta hijo por compartimiento ( $\text{gMS.m}^{-2}$ ). Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas a $p < 0,05$	100
Tabla III-7. Relación Fitomasa Aérea/Fitomasa Subterránea de la unidad de producción (U.P.) y la relación Biomasa Aérea/F. Subterránea para la planta madre y el hijo	106
Tabla III-8. Dinámica de la concentración de nitrógeno (%) de la planta madre por compartimiento. La concentración de nitrógeno de las raíces corresponde a la unidad de producción. Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras distintas indican diferencias estadísticas significativas a $p < 0,05$	110
Tabla III-9. Concentración de nitrógeno (%) del racimo de la planta madre por compartimiento. Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos ( $p < 0,05$ )	110
Tabla III-10. Concentración de nitrógeno (%) de la necromasa aérea de la planta madre por compartimiento. Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos ( $p < 0,05$ )	110
Tabla III-11. Dinámica de la concentración de nitrógeno (%) de la planta hijo por compartimiento y del nieto. Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos por órgano ( $p < 0,05$ )	112
Tabla III-12. Concentración de nitrógeno (%) de la necromasa de la planta hijo por compartimiento. Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos ( $p < 0,05$ )	112
Tabla III-13. Dinámica del nitrógeno acumulado en la fitomasa de la planta madre y compartimientos ( $\text{gN.m}^{-2}$ ). Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar, letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre los muestreos a $p < 0,05$ , los cuadros denotan valores máximos	114
Tabla III-14. Nitrógeno acumulado en los compartimientos del racimo de la planta madre ( $\text{gN.m}^{-2}$ ). Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos a $p < 0,05$	114
Tabla III-15. Nitrógeno acumulado en los compartimientos de necromasa aérea de la planta madre ( $\text{gN.m}^{-2}$ ). Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas a $p < 0,05$	115
Tabla III-16. Dinámica del nitrógeno acumulado en la fitomasa de la planta hijo, compartimientos y el nieto ( $\text{gN.m}^{-2}$ ). Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos a $p < 0,05$	116
Tabla III-17. Nitrógeno acumulado en el compartimiento de necromasa de la planta hijo ( $\text{gN.m}^{-2}$ ). Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas a $p < 0,05$	116

Tabla III-18. Relación carbono/nitrógeno (C/N) de la planta madre, hijo, nieto y compartimientos	121
Tabla III-19. Concentración de nitrógeno ( $\text{mgN.l}^{-1}$ ) en los flujos de precipitación (Pt), goteo+caída directa, flujo caulinar (FC) y escorrentía (Es). Valores promedios de todo el ciclo. Valores pequeños representan la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas a $p < 0,05$	138
Tabla III-20. Nitrógeno ( $\text{g.m}^{-2}$ ), en la precipitación total (Pt), goteo+caída directa, flujo caulinar (FC), precipitación neta (PN) y escorrentía (Es) del período total de la evaluación y acumulado en los diferentes períodos presentados en días después de la siembra (DDS). ND: corresponden a meses no medidos, sue: suelo, fer: fertilizante	141
Tabla III-21. Distribución mensual de las pérdidas de suelo y nitrógeno en el sedimento grueso y fino, medido en las parcelas de erosión	141
Tabla III-22. Cantidad de nitrógeno del fertilizante volatilizado ( $\text{gN.m}^{-2}$ ) durante las tres aplicaciones de fertilizante nitrogenado (urea) en dosis de $13,17 \text{ gN.m}^{-2}.\text{aplicación}^{-1}$ . 1- 28/08/2010; 2- 18/10/2010 y 3- 06/12/2010. Valores pequeños debajo de los valores en negrillas representan la desviación estándar	143
<b>CAPÍTULO IV</b>	
Tabla IV-1. Producción de biomasa total planta madre del cultivo de plátano según diferentes autores con respecto a las condiciones edafoclimáticas y densidad de siembra (D. siembra)	152
<b>CAPÍTULO V</b>	
Tabla V-1. Variables y parámetros utilizados en el modelo de crecimiento de la planta madre de plátano	192
Tabla V-2. Ecuaciones para describir los procesos del crecimiento y partición de asimilados de la planta madre de plátano utilizadas en el modelo	194
Tabla V-3. Variables y parámetros utilizados en el modelo de crecimiento de la planta hijo de plátano	197
Tabla V-4. Ecuaciones para describir los procesos del crecimiento y partición de asimilados de la planta HIJO de plátano utilizadas en el modelo	198
Tabla V-5. Compartimientos, variables y parámetros utilizados en el submodelo de balance de nitrógeno	201
Tabla V-6. Ecuaciones para describir los procesos del submodelo de balance de nitrógeno	203
Tabla V-7. Compartimientos, variables y parámetros utilizados en el submodelo de descomposición	208
Tabla V-8. Ecuaciones para describir los procesos del submodelo de descomposición	210
Tabla V-9. Compartimientos, variables y parámetros utilizados en el submodelo de balance hídrico	212
Tabla V-10. Ecuaciones para describir los procesos del submodelo de balance hídrico	214

Tabla V-11. Compartimientos, variables y parámetros utilizados en el submodelo de evapotranspiración	217
Tabla V-12. Ecuaciones para describir los procesos del submodelo de evapotranspiración	218
Tabla V-13. Compartimientos, variables y parámetros utilizados en el submodelo de evaporación	218
Tabla V-14. Ecuaciones para describir los procesos del submodelo de evaporación	219
Tabla V-15. Parámetros obtenidos de la bibliografía	220
Tabla V-16. Parámetros optimizados con VENSIM	221
Tabla V-17. Valores de las tasas de mortalidad de hojas, seudotallo, raíz y racimo de la planta madre y el hijo	225

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

C.C.Reconocimiento

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

Figura I-1. Estadísticas anuales de área cosechada y producción de bananos y plátanos en Venezuela. A. Área cosechada y B. Producción. Se muestran valores cada cinco años y se incluye el año 2012. Fuente: FAOSTAT (2014)	8
Figura I-2. Esquema de los compartimientos y procesos involucrados en el balance hídrico de un ecosistema	14
Figura I-3. Ciclo del nitrógeno de un agroecosistema	20
Figura I-4. Dibujo de una planta de plátano mostrando sus principales órganos	34
Figura I-5. Etapas del ciclo de vida del plátano Dominico Hartón, en Colombia, bajo condiciones de clima medio a 1310 msnm (Belalcázar, 1991)	37

### CAPÍTULO II

Figura II-1. Ubicación del área de estudio dentro de la zona Sur del Lago de Maracaibo. La Estación Local Chama INIA-Zulia, señalada con una estrella	53
Figura II-2. Evolución de la precipitación anual desde 1995 a 2012 en la Estación Local Chama – INIA – Zulia. Se indica el promedio de todo el intervalo así como los promedios de los períodos 1995 a 2003 y 2004 a 2012	54
Figura II-3. Promedio de la precipitación mensual y amplitud de la precipitación del período 1995 – 2012, en la Estación Local Chama – INIA – Zulia	55
Figura II-4. Climadiagrama de la Estación Local Chama-INIA-Zulia, período 2002-2005. Barras azules corresponden a la precipitación promedio mensual y la línea roja a la temperatura media mensual	55
Figura II-5. Características de la precipitación durante el período de estudio. A. Magnitud, B. Intensidad y C. Duración	59
Figura II-6. Perfil del suelo en la calicata realizada para el estudio exploratorio previo a la instalación del ensayo	60
Figura II-7. Textura al tacto del lote seleccionado para la instalación del experimento de campo. A. Textura de 0 a 10 cm; B. Textura de 10 a 50 cm; C. Textura de 50-70 cm	62
Figura II-8. Distribución espacial del nitrógeno total del suelo en el lote experimental. A. Profundidad 0-20 cm. B. Profundidad 20-50 cm realizado por kriging a partir de la cuadrícula de puntos	65
Figura II-9. Representación del ciclo productivo del plátano Hartón ( <i>Musa AAB</i> ), bajo las condiciones del estudio indicando los períodos en que se realizaron los diferentes muestreos	68
Figura II-10. Esquema de muestreo de raíces en campo, puede observarse como fue extraído un bloque central de 0,80 x 0,80 m entre 0-20 cm de profundidad, ubicado debajo del seudotallo. Se observan los huecos dejados por el barreno ubicados en una cruz que sigue los cuatro puntos cardinales. En cada hueco se separaron las muestras entre 0-20 y 20-50 cm. Ejemplo muestreo 9	71

Figura II-11. Curva de dilución de Greenwood <i>et al.</i> (1990) y se indica un ejemplo de un punto de concentración de nitrógeno. PE: preemergencia; D: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; C: cosecha	73
Figura II-12. Esquema del balance hídrico que fue considerado para el agroecosistema plátano. Variables medidas o estimadas: precipitación (Pt), precipitación neta (PN), goteo (en este caso incluyo la caída directa), flujo caulinar (FC), escorrentía (Es), variación del contenido de agua en el suelo ( $\Delta S$ ), infiltración (INF), transpiración (T), intercepción (INT), evaporación (E), evapotranspiración (ET) y drenaje (D)	74
Figura II-13. Ubicación de las parcelas (cuadros con línea roja) y ubicación de los dispositivos de drenaje, las parcelas de erosión y área de almacenamiento de agua. Los cuadros pequeños representan cada planta establecida	75
Figura II-14. Distribución espacial de los recipientes plásticos para medir la precipitación por goteo+caída directa en el área correspondiente a una planta y fotografía que muestra el dispositivo utilizado	76
Figura II-15. Dispositivo para medir el flujo caulinar en el cultivo plátano Hartón ( <i>Musa AAB</i> )	77
Figura II-16. Esquema de la parcela de escorrentía	79
Figura II-17. Disposición de los lisímetros en la parcela. Los puntos negros indican las plantas	80
Figura II-18. Lisímetro abierto. A. Dibujo y medidas del lisímetro, B. Vista general del dispositivo, C. Detalle de patas telescópicas, D. Capa de granito fino, E. Capa de arena y borde para ajustar en el techo del túnel	81
Figura II-19. Secuencia de instalación de los lisímetros. A. Construcción de calicata inicial, B y C. vista de calicata y entrada del túnel, D. Túnel y soporte de patas del lisímetro, E. Colocación de lisímetro, F. Vista del gato para subir y ajustar el lisímetro, G. Lisímetros instalados y conectados, H. Envases colectores, I. Vista general y techo sobre la calicata, en E y G se observa el revestimiento de madera del techo y paredes del túnel	82
Figura II-20. Esquema de los compartimientos y flujos considerados para el cálculo del balance de nitrógeno	85
Figura II-21. Distribución de los puntos de donde se obtuvieron submuestras de suelo en el área correspondiente a una planta de plátano. Se definen cinco áreas concéntricas y en cada una se extrae un número de muestras proporcional al área, equivalente a una submuestra por cada cuatro cuadrados de 0,25 x 0,25 m	86
Figura II-22. Trampa para obtener el amoníaco volatilizado del fertilizante en el campo	88
Figura II-23. Disposición en el campo de los cilindros trampa utilizados para medición de la pérdida de nitrógeno por volatilización. Un juego de cilindros se instala sobre la banda de fertilización y los testigos se instalan en la calle. Obsérvense los pluviómetros para colectar el agua de lluvia que cada dos días se añade a los cilindros trampa	88
Figura II-24. Cronograma de prácticas de manejo del cultivo experimental de plátano Hartón	91
Figura II-25. Sistema de orientación de los hijos de la planta de plátano. Los círculos con la X, son los hijos y nietos que se eliminan durante el deshije	91

### CAPÍTULO III

- Figura III-1. Dinámica de crecimiento de la fitomasa y biomasa por compartimiento de la planta madre. Los símbolos representan los valores promedios de cada muestreo y las barras la desviación estándar. Las curvas corresponden a las funciones de ajuste mostradas en el anexo III-1. Las letras superiores, representan las fechas de siembra (S), preemergencia (PE), hoja 7 (H7), diferenciación floral (DF), hoja 25 (H 25), emergencia de la bellota (EB) y cosecha (C) 96
- Figura III-2. Dinámica de crecimiento de la fitomasa y biomasa por compartimiento de la planta hijo. Los símbolos representan los valores promedios de cada muestreo y las barras la desviación estándar. Las curvas corresponden a las funciones de ajuste mostradas en el anexo III-1. Las letras superiores, representan los DDS de la presencia de la yema (Y), hoja 1 (H 1), hoja 8 (H 8) y hoja 18 (H 18) 101
- Figura III-3. Distribución porcentual de la fitomasa entre los compartimientos u órganos de la madre, el hijo y la unidad de producción (U.P.) medidos en un cultivo de plátano Hartón, con los días transcurridos después de la siembra (DDS) 103
- Figura III-4. Distribución vertical y horizontal de la densidad de las raíces de la unidad de producción ( $\text{mg.cm}^{-3}$ ) desde el cormo 105
- Figura III-5. A. tasa de crecimiento absoluto de la planta madre (línea trazos y dos puntos), tasa de crecimiento absoluto del racimo (línea punteada) y tasa de retranslocación de asimilados desde la planta madre hacia el racimo (línea continua) y B. tasa de crecimiento absoluto de la unidad de producción (línea trazos y un punto), tasa de crecimiento del hijo (línea trazos) y la tasa de retranslocación de asimilados hacia el hijo (línea continua), con los días después de la siembra 107
- Figura III-6. Concentración de nitrógeno (%) en los órganos de la planta madre y del hijo, la concentración de nitrógeno de las raíces corresponde a la unidad de producción. Las líneas verticales representan el valor de la desviación estándar 109
- Figura III-7. Distribución porcentual del nitrógeno acumulado en los compartimientos para la planta madre, el hijo y la unidad de producción del plátano Hartón, con los días transcurridos después de la siembra 118
- Figura III-8. Distribución porcentual del nitrógeno almacenado en la unidad de producción entre la madre, el hijo y el nieto al momento de la cosecha de la madre 118
- Figura III-9. Tasa diaria de acumulación de nitrógeno en A. la planta madre (línea a trazos y dos puntos), racimo (línea punteada) y tasa de retranslocación de nitrógeno hacia el racimo (línea continua) y B. tasa de acumulación de nitrógeno de la unidad de producción (línea a trazos y un punto), del hijo (línea a trazos) y la tasa de retranslocación de nitrógeno hacia el hijo (línea continua), con los días después de la siembra 120
- Figura III-10. Curva del porcentaje de nitrógeno en el cultivo de plátano Hartón en función de su fitomasa total. Los rombos son los datos de campo de la madre, la línea solida curva propuesta para el plátano, línea a trazos curva de dilución de Greenwood *et al.* (1990) para plantas CD ( $\%N_{\text{crítico}} = 5,7 W^{-0,5}$ ); las equis datos de campo de la planta hijo 122

Figura III-11. Índice de nutrición de nitrógeno (INN) de la planta madre e hijo de plátano Hartón. Línea sólida en uno es la condición ideal de nutrición de nitrógeno; rombos datos de campo; triángulos, momentos de la aplicación del fertilizante y en la parte superior estados fenológicos: PE, preemergencia; DF, diferenciación floral; EB, emergencia de la bellota; C, cosecha	124
Figura III-12. A: Índice de área foliar (LAI), B: Cantidad acumulada de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) de la unidad de producción (U.P.), la planta madre y el hijo de plátano Hartón, C: Eficiencia del uso de la luz (RUE) de la UP de plátano Hartón	125
Figura III-13. Dinámica mensual de la precipitación total (Pt), goteo+caída directa, flujo caulinar (FC), precipitación neta (PN), intercepción (INT), escorrentía (Es), infiltración (INF) y evapotranspiración (ET) durante el período de evaluación. El corte en las líneas corresponde a meses no medidos	127
Figura III-14. Proporción de la precipitación neta que se produce por goteo+caída directa y por flujo caulinar de un cultivo de plátano Hartón ( <i>Musa AAB</i> ). Los números en la figura representan el valor máximo y mínimo de cada flujo	128
Figura III-15. Relación entre el promedio mensual del área foliar total de la planta de plátano Hartón ( $m^2 \cdot planta^{-1}$ ) y el flujo caulinar mensual	128
Figura III-16. Porcentaje de lo que sale de la precipitación total del sistema por intercepción y escorrentía o que infiltra en el suelo de un cultivo de plátano Hartón ( <i>Musa AAB</i> ). Los números representan el valor máximo y mínimo de cada flujo	128
Figura III-17. Flujos de goteo+caída directa, intercepción, caulinar y escorrentía en función de la precipitación diaria en plátano Hartón. La línea representa la regresión lineal de los datos	129
Figura III-18. Distribución espacial del goteo+caída directa en cada planta evaluada. A. Acumulado por pluviómetro bajo la planta de todos los eventos medidos, se resaltan dos pluviómetros para denotar la variabilidad, puntos (7) y trazos (21). B. distribución espacial del goteo+caída directa acumulado.	131
Figura III-19. Distribución del flujo de goteo+caída directa (mm) en cuatro magnitudes de precipitación en el cultivo del plátano Hartón	132
Figura III-20. Distribución del flujo de goteo+caída directa (mm) en dos tamaños de área foliar (AF) y tres magnitudes de precipitación	133
Figura III-21. Agua almacenada en el suelo (mm) y precipitación acumulada entre dos muestreos consecutivos (mm)	134
Figura III-22. Balances hídricos del agrosistema plátano durante las etapas de crecimiento vegetativo (0-134 DDS), reproductiva (134-219 DDS), productiva (219-293 DDS) y ciclo total (0-293 DDS), valores en mm. Pt: precipitación total; INT: intercepción; ET: evapotranspiración; PN: precipitación neta; FC: flujo caulinar; INF: infiltración; Es: escorrentía; ΔS: Almacenamiento del suelo; D: drenaje. La ET se calculó con el modelo de simulación y el D por balance	135

Figura III-23. Nitrógeno mineral total, amonio y nitrato en $\text{g.m}^{-2}$ del suelo en la plantación de plátano Hartón en las profundidades de 0-20 cm, 20-50 cm y 0-50 cm. Barras negras representa la desviación estándar positiva y los puntos los momentos de aplicación del fertilizante al suelo	137
Figura III-24. Concentración de las formas de nitrógeno mensual en la precipitación total (Pt), goteo+caída directa, flujo caulinar (FC), escorrentía (Es). Durante los primeros meses no se midió goteo+caída directa y FC por estar el cultivo poco desarrollado. Los asteriscos en Es representan los momentos de la fertilización	139
Figura III-25. Relación entre la concentración de amonio y nitrato de la escorrentía y flujo caulinar con la precipitación mensual	140
Figura III-26. Relación de los sedimentos totales y la precipitación diaria	142
Figura III-27. Relación de la pérdida de suelo (Sedimento) y la escorrentía diaria	142
Figura III-28. Curso de la pérdida de nitrógeno por volatilización en las tres aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en el cultivo de plátano Hartón en los tratamientos con y sin aplicación de fertilizante en forma de urea	144
Figura III-29. Balance de nitrógeno del agroecosistema del plátano Hartón entre la siembra y la cosecha. Se consideran solamente las entradas y salidas. El lavado fue estimado utilizando el modelo. Los flujos están dados $\text{g.m}^{-2}.\text{ciclo}^{-1}$ . Flujos de entrada por precipitación (Pt), fertilización (Fer.), flujos de salida por volatilización (Vol.), escorrentía (Es), lavado, erosión y cosecha. El lavado fue estimado de los resultados del modelo. El símbolo (+) representa ganancia	146
Figura III-30. Balance de nitrógeno del agroecosistema plátano en cuatro períodos, expresados en $\text{gN.m}^{-2}$ . A. Siembra a Diferenciación floral; B. Diferenciación floral a Emergencia de la bellota; C. Emergencia de la bellota a Cosecha y D. Siembra a Cosecha. Flujos de entrada por precipitación (Pt), fertilización (Fert.), flujos de salida por volatilización (Vol.), escorrentía (Es), lavado y cosecha; transferencias internas por precipitación neta (PN), absorción, mortalidad y los compartimientos de suelo con el nitrógeno orgánico (N org), nitrógeno mineral (N min) y el flujo de mineralización o inmovilización; unidad de producción (U.P.), Variación de nitrógeno del suelo ( $\Delta S$ ). El lavado fue estimado de los resultados del modelo. Los símbolos (+) y (-), representan ganancia o pérdida durante el intervalo	147
Figura III-31. Flujos netos de mineralización e inmovilización en $\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ , entre los períodos muestreados, Las flechas indican los momentos de la fertilización. Los flujos fueron calculados por balance entre entradas y salidas al compartimiento de nitrógeno mineral.	148

#### **CAPÍTULO IV**

Figura IV-1: Regresiones lineales establecidas con la información de la tabla IV-1. Relaciones entre: A. la elevación y la duración del ciclo de la planta madre, B. la elevación y la producción por área, C. el área por planta y la producción por área, D. entre el área por planta y la producción por planta, E. la MOS y la producción por planta y F. el pH y la producción por planta. El punto rojo corresponde a los datos de esta tesis. En algunos casos la regresión se calculó incluyendo o excluyendo el punto de esta tesis	153
--	-----

## CAPÍTULO V

- Figura V-1. Esquema del modelo de simulación del cultivo de plátano con sus diferentes submodelos y sus interacciones. Se indica la información de entrada requerida para correr el modelo y la información principal generada por el mismo 187
- Figura V-2. Modelo de la producción primaria neta real (PPN real) a partir de la radiación incidente (RAD). El círculo amarillo representa la variable exógena radiación total, los círculos azules son datos de entrada medidos experimentalmente (AFE: área foliar específica del cultivo, RUE: Eficiencia en el uso de la radiación) y los hexágonos azules representan el factor 0,48 para pasar de RAD a PAR y k, el parámetro coeficiente de extinción de la luz 189
- Figura V-3. Curso del área foliar específica a lo largo del desarrollo del cultivo medida experimentalmente y utilizada en el modelo para pasar los datos de biomasa foliar a área foliar. 190
- Figura V-4. Ajuste del índice de área foliar (LAI) medido en campo a una ecuación polinómica para el cálculo del LAI diario en la estimación del RUE real 190
- Figura V-5. Estructura del submodelo de planta madre del cultivo de plátano, donde se observan los flujos de translocación inicial, distribución de asimilados, translocación al racimo y mortalidad. Vista general VENSIM en anexo V-1 195
- Figura V-6. Estructura del submodelo de planta hijo del cultivo de plátano, donde se observa la translocación inicial, distribución de asimilados y mortalidad. Vista general VENSIM en anexo V-2 197
- Figura V-7. Estructura del submodelo de balance de nitrógeno del agrosistema plátano, donde se observan los flujos de absorción de la madre y del hijo, las salidas y entradas de los compartimientos. Abreviaturas y formulas en los Tablas V-5 y V-6. Vista en VENSIM anexo V-3 199
- Figura V-8. Eficiencia de absorción de la planta madre calculada como la curva envolvente de la relación entre el N<sub>min</sub> del suelo y la cantidad de N absorbida por unidad de biomasa de raíces. Cuadros rojos puntos no considerados para el cálculo de la eficiencia de absorción 201
- Figura V-9. Funcionamiento del factor de reducción ( $f(N_2)$ ), en diferentes situaciones hipotéticas de la disponibilidad (Disp) de N 205
- Figura V-10. Estructura del submodelo de descomposición del agrosistema plátano, donde se observan los flujos de salida y entrada de los compartimientos. En los Tablas V-7 y V-8 se muestran las abreviaturas y ecuaciones. Vista general VENSIM en anexo V-4 206
- Figura V-11. Factor de reducción por temperatura utilizado en el submodelo de descomposición 207
- Figura V-12. Estructura del submodelo de balance hídrico del agrosistema plátano, donde se observan los flujos de salidas y entradas de los compartimientos. Vista en VENSIM anexo V-5 211
- Figura V-13. Comportamiento del factor de reducción de agua en la capa 1 utilizado para reducir la transpiración potencial en función de la disponibilidad de agua en el suelo y que también se utiliza como función de respuesta para reducir la PPN<sub>pot</sub> a PPN<sub>real</sub> ( $f(\text{agua})$ ) 215

Figura V-14. Coeficientes de partición de asimilados de la PPN a los diferentes órganos de la planta madre de plátano obtenidos por calibración (curva roja). La curva punteada representa una generalización o estilización de la curva obtenida por calibración	223
Figura V-15. Coeficientes de partición de asimilados de la PPN del hijo a los diferentes órganos de la planta hijo de plátano obtenidos por calibración. Las líneas puntuadas muestran una generalización de la tendencia	223
Figura V-16. Coeficientes de asignación de asimilados del cormo madre a los compartimientos de raíz, racimo, al hijo y los hijos extra de la planta de plátano obtenidos por calibración. En este caso el coeficiente de asignación representa la proporción de la biomasa del cormo que diariamente es transferida a los otros órganos	224
Figura V-17. Coeficientes de asignación de asimilados del cormo hijo a los compartimientos de raíz, hoja,seudotallo, nieto y los nietos extra de la planta de plátano obtenidos por calibración	225
Figura V-18. Tasa de mortalidad de los compartimientos de la planta madre (m) y el hijo (h) de la planta de plátano, obtenidos por calibración	226
Figura V-19. RUE real y potencial y su correlación, funciones de respuesta al agua y al nitrógeno y mínimo de ambas	228
Figura V-20. Producción primaria neta real y potencial de la planta madre por día y acumulada	229
Figura V-21. Índice de área foliar (LAI) observado y simulado para la planta madre (A) y la planta hijo (B) de plátano Hartón. Valor observado (Obs), Valor simulado (Sim), Error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE). Para los valores observados se presenta la media $\pm$ DE	230
Figura V-22. Dinámica observada y simulada del crecimiento de la fitomasa y biomasa por compartimiento de la planta madre. Valor observado (Obs), Valor simulado (Sim), biomasa de hoja (Bhoja), biomasa deseudotallo (Bseudo), biomasa de racimo (Brac), necromasa aérea (mNEaerea), fitomasa del cormo (Bcormo), fitomasa de raíz (mBraíz), fitomasa de cormos de hijos extra (BCormoHijosExtra), error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE)	231
Figura V-23. Dinámica observada y simulada del crecimiento de la fitomasa y biomasa por compartimiento de la planta hijo. Valor observado (Obs), valor simulado (Sim), biomasa de hoja (hBhoja), biomasa deseudotallo (hBseudo), fitomasa del nieto (hBnieto), necromasa aérea (hNEaérea), fitomasa del cormo (hBcormo), fitomasa de raíz (hBraíz), fitomasa de nietos extra (hBNietosExtra), error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE)	232
Figura V-24. Precipitación neta, escorrentía e infiltración, para los valores observados (Obs) y simulados (Sim), durante el período de evaluación. El desfase en las curvas de precipitación neta e infiltración se debe a período no medido. Error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE)	234
Figura V-25. Drenaje simulado del agroecosistema plátano	234
Figura V-26. Valores observados (Obs) y simulados (Sim) del contenido de agua en el suelo en la capa 1 (A) y en la capa 2 (B). Error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE)	235

Figura V-27. Nitrógeno mineral total observado (Obs) y simulado (Sim) del suelo de la plantación de plátano Hartón. Error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE)	236
Figura V-28. Nitrógeno observado (Obs) y simulado (Sim) en la Biomasa de la planta madre (A) y planta hijo (B). Error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE)	236
Figura V-29. Nitrógeno lavado simulado del agroecosistema plátano	237
Figura V-30. Dinámica observada (Obs) y simulada con cada uno de los factores de reducción de N del crecimiento de la biomasa de las hojas (Bhoja) de la planta madre	238
Figura V-31. Nitrógeno en sedimento simulado del agroecosistema plátano	238
Figura V-32. Relación entre el valor del coeficiente de extinción de la luz (k) y la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) calculada como producción total al momento de la cosecha entre radiación fotosintéticamente activa interceptada. El punto rojo representa el valor utilizado en el modelo	241
Figura V-33. Diferentes formas que puede adoptar la función de respuesta al contenido de agua en el suelo según el cultivo sea más sensible (forma cóncava) o más tolerante (forma convexa) al stress hídrico. Tomado de Steduto <i>et al</i> (2009)	243

## ÍNDICE DE ANEXOS

### CAPÍTULO III

Anexo III-1. Funciones y Coeficientes que describen el curso de la fitomasa ( $\text{gMS.m}^{-2}$ ) de la unidad de producción y la madre, hijo y nieto con sus compartimientos en función de los días después de la siembra, del plátano Hartón.	274
Anexo III-2. Funciones y coeficientes que describen el curso del nitrógeno en la biomasa ( $\text{gMS.m}^{-2}$ ) de la unidad de producción, madre, hijo y nieto con sus compartimientos, con los días después de la siembra (x) del plátano Hartón	274
Anexo III-3. Curso del nitrógeno acumulado para la planta madre y los órganos. Los símbolos corresponden a los valores promedio en cada muestreo y las líneas verticales los valores respectivos a la desviación estándar, en su porción positiva. Las curvas corresponden a funciones de ajuste para cada variable (anexo III-2)	275
Anexo III-4. Curso del nitrógeno acumulado para la planta hijo, sus órganos y el nieto. Los símbolos corresponden a los valores promedio en cada muestreo, las líneas verticales los valores respectivos a la desviación estándar, en su porción positiva. Las curvas corresponden a funciones de ajuste para cada variable (anexo III-2)	276
Anexo III-5. Curvas que describen el N total acumulado en la Unidad de producción, planta madre, hijo y racimo	276
Anexo III-6. Concentración de las formas de nitrógeno mensual ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) en la precipitación total (Pt), goteo+caída directa, flujo caulinar (FC), escorrentía (Es). Los números pequeños a la izquierda corresponden a la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas a $p < 0,05$ con respecto al tiempo. ND corresponden a flujos no medidos	277

Anexo III-7. Datos de la dinámica hídrica mensual (mm). Precipitación total (Pt), flujo caular (FC), precipitación neta (PN), intercepción (INT), escorrentía (Es), infiltración (INF), evapotranspiración (ET). Los números pequeños corresponden a la desviación estándar, ND, corresponden a datos no medidos 278

Anexo III-8. Datos del balance hídrico por período medición (mm). Precipitación total (Pt), flujo caular (FC), precipitación neta (PN), intercepción (INT), escorrentía (Es), infiltración (INF), humedad del suelo (S), evapotranspiración (ET). Los números pequeños corresponden a la desviación estándar. ND corresponden a datos no medidos y calculados por balance 278

## **CAPÍTULO V**

Anexo V-1. Submodelo Planta madre, vista general en VENSIM 279

Anexo V-2. Submodelo Planta hijo, vista general en VENSIM 280

Anexo V-3. Submodelo Balance de N, vista general en VENSIM 281

Anexo V-4. Submodelo Descomposición, vista general en VENSIM 282

Anexo V-5. Submodelo Balance hídrico, vista general en VENSIM 283

Anexo V-6. Submodelo Evapotranspiración, vista general en VENSIM 284

Anexo V-7. Submodelo Evaporación del suelo e Infiltración, vista general en VENSIM 285

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo conocer algunos aspectos básicos del funcionamiento del agroecosistema plátano bajo las condiciones del Sur del Lago de Maracaibo, información indispensable para diseñar prácticas agrícolas que puedan aumentar la sustentabilidad y mejorar el manejo de este importante cultivo. Los tres aspectos analizados, altamente relacionados entre sí, fueron la dinámica de crecimiento de la planta, el balance hídrico y el ciclado de nitrógeno. Este elemento se escogió por ser uno de los más influyentes en la producción vegetal y que a su vez resulta más móvil y propenso a perderse y producir contaminación ambiental, por lixiviación, emisiones gaseosas o elevación de su concentración en suelos y capa freática. El estudio de estos aspectos en cultivos de musáceas (bananos y plátanos) plantea interesantes desafíos metodológicos relacionados con la forma de crecimiento y tamaño de las plantas, por lo que el trabajo constituye también una propuesta metodológica para el análisis agroecosistémico de este cultivo. Complementariamente, se utilizó la modelización para integrar el conocimiento obtenido, con el propósito de contribuir en el desarrollo de una herramienta que permita evaluar alternativas de manejo para aumentar la productividad y minimizar los problemas ambientales. La tesis se desarrolló en las instalaciones de la Estación Local Chama, adscrita al INIA-Zulia, en un lote que fue sembrado de plátano Hartón. Durante el desarrollo del cultivo, hasta la cosecha de la planta madre, se realizaron once muestreos destructivos de biomasa vegetal, la cual fue separada por órganos, incluyendo muestreos exhaustivos de la biomasa de raíces. Se estimó el peso seco de todos los órganos y se analizó nitrógeno total. Además se instaló una estación meteorológica, para recolectar datos de radiación, temperatura y precipitación total. La medición de los flujos y del N en el agua de goteo+caída directa y N de la precipitación total, se efectuó con pluviómetros instalados dentro y fuera de la plantación, el flujo caulinar se obtuvo con mangueras plásticas sujetas alseudotallo de la planta. La salida de agua y N por escorrentía superficial se midió utilizando parcelas de escorrentía que permitieron también estimar las pérdidas de suelo y nitrógeno por erosión. La volatilización, se determinó por el método semiabierto estático para la captura del amoníaco. La dinámica del agua y del N en el suelo se estudió mediante muestreos realizados en las mismas fechas que los del crecimiento de las plantas, en dos capas de suelo (0-20 y 20-50 cm). La información obtenida permitió la construcción y calibración de un modelo de simulación del desarrollo del cultivo, que incluyó submodelos para el crecimiento de las plantas y para el agua, el nitrógeno y la materia

orgánica del suelo. Entre los resultados obtenidos se puede mencionar la caracterización detallada de la dinámica del crecimiento del cultivo de plátano, la cual sigue un patrón con tres etapas de crecimiento bien diferenciadas: Etapa de crecimiento vegetativo, etapa reproductiva y etapa productiva, las cuales se caracterizaron en función de una serie de variables como la biomasa por órgano, las tasas de crecimiento, la concentración de N, la relación carbono/nitrógeno y biomasa aérea/biomasa subterránea, la eficiencia en el uso de la luz, las tasas de absorción de N, entre otras. El sistema radicular se distribuyó más horizontalmente que verticalmente, orientado radialmente, poco profundo y decreció al alejarse del cormo, la exploración del suelo se realiza de forma progresiva y es mucho más exhaustiva en la primera capa del suelo, por la mayor densidad de raíces que en la segunda capa. La concentración promedio de N en los diferentes órganos de la planta se presentó en el siguiente orden: hoja>seudotallo>raíces>racimo>cormo. La dinámica del N, en la planta está asociada a la acumulación de materia seca y se determinó que la planta acumula en la etapa de crecimiento vegetativo, aproximadamente el 50% del total y en la etapa reproductiva el restante 50%. Esto nos indica que durante la etapa de crecimiento vegetativo, se aplicó un exceso de fertilizante, en cuanto a la etapa reproductiva, la dosis fue inferior al requerimiento de la planta, lo que se considera una debilidad en la sincronización de la fertilización con el crecimiento de la planta. La curva de dilución de N, presentó características diferentes a la típica de las plantas C3, con una curva dividida en dos partes, la primera donde aumenta el contenido de N en la planta y la segunda que sigue la curva propuesta por Greenwood. El índice de nutrición de nitrógeno fue un buen indicativo de la nutrición de la planta madre y el hijo, mostrando algunos períodos con un déficit de N moderado. Con respecto a los flujos del balance hídrico, podemos indicar que el flujo de goteo+caída directa representa un porcentaje de la precipitación neta mucho mayor que el flujo caulinar, siendo distribuido sobre el suelo de una manera bastante heterogénea por la acción de la cubierta vegetal. El principal flujo de salida fue la escorrentía que si la sumamos a la interceptación, tenemos que menos de la mitad del agua que ingresó por precipitación se infiltra en el suelo, planteando un posible déficit hídrico a pesar de las lluvias abundantes. Los flujos de salida siguieron una secuencia de importancia como sigue: escorrentía>evapotranspiración>drenaje> interceptación. En general, las concentraciones de N en los flujos de precipitación, goteo+caída directa y flujo caulinar, están en el rango reportado para varios ecosistemas naturales y agrícolas. Hay que resaltar que la altísima escorrentía que caracterizó el balance hídrico, no se reflejó en una pérdida alta de N por esta vía, a pesar de que el fertilizante fue aplicado sobre la superficie del suelo. La concentración y pérdidas de N en el

drenaje, estimados por el modelo ya que el dispositivo de medición tuvo problemas metodológicos, lo ubican como la principal salida del sistema y la volatilización de la urea aplicada representa la segunda pérdida en importancia. Por otra parte la erosión del suelo puede considerarse moderada, con un patrón que sigue los eventos de precipitación. La pérdida de nitrógeno por esta vía es proporcional a la pérdida de sedimentos ya que la concentración permaneció casi constante. El balance de nitrógeno es ligeramente positivo, con un 9% de las entradas que permanecen en el agroecosistema después de la cosecha. Si bien la absorción de N por la planta ( $30,52 \text{ g.m}^{-2}$ ) equivale casi al 80% del N aplicado por fertilización, el 65% del mismo retornó al suelo a través de las podas de las hojas y el seudotallo. El suelo presenta un balance de N ligeramente negativo ( $-2,9 \text{ g.m}^{-2}$ ), lo que podría estar afectando la sustentabilidad del sistema con respecto a este elemento. Esto nos indica que el agroecosistema tiene una baja eficiencia en el uso del fertilizante y un alto potencial de pérdidas, favorecido por las condiciones climáticas que posibilitan un acelerado proceso de descomposición y posiblemente el manejo agronómico del cultivo, que no promueve la acumulación de materia orgánica en el suelo, por lo tanto, para mantener la producción, las dosis de fertilizante deben mantenerse altas en el tiempo, que se traduce en contaminación del aire y de los efluentes del Lago de Maracaibo. El modelo, una vez calibrado, simuló de forma satisfactoria la mayoría de los procesos. En general, el enfoque agroecosistémico, fue acertado para abordar esta tesis, ya que permitió con el uso de herramientas ecológicas, comprender el funcionamiento del agroecosistema del cultivo de plátano en el sur del Lago de Maracaibo, bajo las condiciones de estudio y plasmarlo en un modelo de simulación.

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, MARCO CONCEPTUAL, ANTECEDENTES, PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS.**

### **I.1. Introducción**

#### **I.1.1. Retos de la investigación agronómica para una agricultura sustentable**

El mundo actual se caracteriza por el desarrollo desigual, el uso insostenible de los recursos naturales, la intensificación de los efectos del cambio climático, la persistencia de la pobreza y el aumento de enfermedades (Thornton y Cramer, 2012; French *et al.*, 2014). Muchos de los mencionados problemas han sido generados por la sobreexplotación y mal manejo de los recursos naturales, que ha causado la disminución de la diversidad biológica, la reducción de las fuentes de agua y combustible, la creciente inestabilidad en torno a la escasez de tierra, erosión y degradación de los suelos, la contaminación de agua superficial y subterránea, emisión de gases de efecto invernadero, enfermedades por mala calidad de los alimentos y la aplicación de productos químicos en las comunidades rurales. Grandes problemas que lejos de revertirse se agudizan y plantean serias incertidumbres sobre el futuro de nuestra especie y la estabilidad del sistema agroalimentario.

La agricultura, como pilar fundamental del desarrollo humano, ha contribuido a aumentar la producción de alimentos y fibras a medida que se produjo el vertiginoso aumento de la población humana durante el siglo XX. A este aumento contribuyó la intensificación de la producción agrícola después de la segunda guerra mundial en los países industrializados, proceso conocido como revolución verde, y la aplicación posterior de esta tecnología en otras regiones (Darst, 2001). Si bien la revolución verde, tuvo un éxito innegable en el aumento de la producción agrícola, algunas de las prácticas en las que se basó pueden, en retrospectiva, calificarse como altamente insostenibles desde el punto de vista ambiental y social (Darst, 2001; Foresight, 2011). En este grave escenario en el que dependemos de unos sistemas agrícolas altamente insostenibles, que van degradando la base ambiental de los sistemas de producción, la investigación agronómica está llamada a desempeñar un rol crítico en el diseño de una nueva agricultura que pueda ser al mismo tiempo productiva y sustentable (Jiménez, 2002; French *et al.*, 2014).

Una intensa selección genética llevó a la creación de las llamadas variedades mejoradas de los principales cultivos, lo cual aunado al desarrollo de agroquímicos para el control de plagas y enfermedades, a la tecnificación del riego, y al uso masivo de fertilizantes químicos, permitió la

intensificación agrícola bajo el modelo de la revolución verde, que ha logrado satisfacer la demanda de alimentos de la población en ciertas áreas, sin necesidad de un incremento significativo en la superficie de cultivo. Sin embargo, las áreas bajo estos sistemas de cultivo han experimentado degradación de sus suelos por erosión y baja incorporación de materia orgánica, las plagas y enfermedades se han hecho resistentes a los agroquímicos por lo que cada vez se requieren mayor número de aplicaciones o nuevos productos y los fertilizantes han contaminado las aguas continentales y oceánicas y contribuido a los gases efecto invernadero (Jiménez, 2002; Thornton y Cramer, 2012). En este sentido, los avances en la productividad agrícola con el modelo de la revolución verde, conllevan perjuicios ambientales que comprometen no solo al ambiente y los ecosistemas naturales sino también a la propia existencia y productividad de estos sistemas de cultivo (Darst, 2001; French *et al.*, 2014).

En este contexto, la producción agrícola tiene que hacer frente a retos significativos en términos estructurales y globales, que frente al incremento de la población mundial, permitan el incremento de la oferta de alimentos, sin un aumento del área sembrada, de manera que satisfacer la demanda dependerá básicamente de la mejora en los rendimientos (Jiménez, 2002; Foresight, 2011; Van Ittersum *et al.*, 2013).

Para hacer frente al reto de mejorar los rendimientos, la agricultura actual y futura debe evolucionar en sus estrategias y prácticas, a fin de evitar los impactos negativos que tuvieron lugar en el pasado. Es necesario, un nuevo concepto de agricultura, capaz de armonizar el incremento de la producción de alimentos y fibras, con el aprovechamiento racional, equilibrado y económico de los recursos naturales y la calidad del ambiente. El siguiente paso en esta evolución es hacia una agricultura sostenible que se basara más en el manejo inteligente de los procesos biológicos y en la utilización de recursos renovables (Jiménez, 2002; Foresight, 2011; French *et al.*, 2014).

Formalmente, la agricultura sostenible puede ser definida como un sistema integrado de prácticas de producción agrícola, cuya aplicación es dependiente de los ambientes o localidades, con la utilización eficiente de insumos y tecnologías agrícolas, sin comprometer la conservación de los recursos naturales, la calidad del ambiente y de los productos (Jiménez, 2002). La transición entre estas dos formas de agricultura, la actual y la deseada, no es simple y requerirá nuevos y mejores conocimientos de los procesos biológicos (Jiménez, 2002; French *et al.*, 2014).

Las modificaciones que deben ser introducidas en los sistemas de producción agrícola en camino a la sustentabilidad pueden ser diversas. No obstante, existen algunos principios generales o estrategias, que pueden ayudar para la puesta en práctica de la agricultura sustentable: 1. la

elección de especies y variedades de plantas mejor adaptadas a las condiciones y lugares de producción; 2. la diversificación de cultivos, así como de prácticas culturales, con objeto de mejorar la calidad biológica y económica; 3. el manejo adecuado del agua y del suelo para asegurar su conservación y mejorar su calidad y 4. el uso eficiente de los insumos. Aun así, es necesario señalar que la aplicación directa y generalizada de dichas estrategias no está exenta de dificultades (Darst, 2001; Jiménez, 2002; Foresight, 2011).

Para lograr estos fines, la agenda de investigación agrícola debe integrar diferentes disciplinas y métodos, para analizar la agricultura de una manera más amplia e integral, por lo que es necesario mejorar o incrementar los conocimientos de los procesos agrícolas, los ciclos de nutrientes, la transformación de la energía y los aspectos sociales, para ser estudiados como un todo y comprender mejor las implicaciones que pueden tener las modificaciones introducidas y valorar sus consecuencias con base en el conocimiento científico y técnico (Altieri, 1999; Jiménez, 2002).

En este orden de ideas, específicamente el sistema tradicional de producción del cultivo de plátano, se basa en el enfoque de la revolución verde, por lo que muchos de los problemas referidos se presentan y se enfocan principalmente con el manejo de plantaciones permanentes, que las hacen más vulnerables a situaciones ambientales adversas (vientos fuertes, inundaciones) y plagas, como es el caso de la Sigatoka Negra. Estas plantaciones presentan densidades por debajo de 1800 plantas.ha<sup>-1</sup>, prácticas de combate de malezas (manual y químico), control químico de plagas, deshoje, desburre, resiembra y fertilización química efectuada a juicio del productor (generalmente cada 3 meses), lo que en algunos casos conduce a un uso indiscriminado e ineficiente de los agroquímicos.

Como se indicó anteriormente, el mercado exige mayor producción de fruta y una manera de competir es con el mejoramiento de la tecnología aplicada a nivel del cultivo, lo cual trae consigo un aumento de la productividad y aumento del uso intensivo de agroquímicos, que dada la actual situación de abastecimiento, existe la posibilidad de la aplicación de productos no adecuados y en momentos no oportunos (Calvo, 2003; Abreu *et al.*, 2007).

Un aspecto a mejorar en el sistema del cultivo actual, es la práctica de la fertilización, donde se disponen de normas de referencia de suelo y planta para evaluar el estado nutricional del plátano, la dosificación de las fuentes de fertilizante y estándares biométricos de las plantas con rendimientos altos y las características de suelos ideales para obtenerlos (Rodríguez y Rodríguez, 1996; Rodríguez *et al.*, 2007), pero las características edáficas contrastantes debido al

origen aluvial de los suelos (Kijewski *et al.*, 1981), el clima, la forma y sincronización de aplicación de los fertilizantes afectan su aprovechamiento. Para lograr, determinar el problema de fondo en la fertilización, debemos conocer el funcionamiento del sistema, ya que no existe información del balance hídrico, importancia de los procesos, por los cuales ocurren las entradas y salidas de agua y las pérdidas, en este caso de nitrógeno, debido a que la principal fuente utilizada es la urea, aspectos a determinar, jerarquizar y manejar, si se quiere lograr que la dosis recomendada, llegue a la planta y optimizar el uso de fertilizantes en los sistemas de producción; además de, generar líneas de trabajo para la incorporación de otras estrategias para el mejoramiento sustentable de este tipo de agroecosistemas.

### **I.1.2. Importancia social y económica de la producción de musáceas**

El cultivo de las musáceas (bananos, plátanos y topochos), es importante para alrededor de 50 países productores a nivel mundial por su aporte social y comercial (interno y externo). Constituye el cuarto producto alimenticio a nivel global, después del arroz, trigo y maíz en términos del producto interno bruto; en particular, el plátano constituye un producto básico en la dieta de muchas comunidades rurales y urbanas, en muchos de estos países, especialmente africanos y latinoamericanos, cultivado principalmente por pequeños y medianos productores donde la mayor parte de su producción está destinada al autoconsumo (Thieuleux, 2006; Baiyeri *et al.*, 2013; FAOSTAT, 2014).

En Venezuela, el cultivo del plátano en los últimos 10 años, como se observa en la figura I-1, ha incrementado su importancia, debido a la caída del área cosechada del banano, como consecuencia de los problemas con el mercado de exportación, igualmente el área de plátano ha retrocedido pero a diferencia del banano ha ocurrido por problemas climáticos que han azotado a las principales zonas productoras, con un ligero aumento para el año 2012; sin embargo, se presenta una diferencia importante ya que el rendimiento del banano ha disminuido en 26% en comparación a 1965 mientras que el del plátano se ha incrementado en 100%. Para el año 2012, la superficie sembrada de plátano en el país fue de aproximadamente 50.000 ha, con una producción promedio de 10 Mg.ha<sup>-1</sup>, superior al rendimiento mundial de 8,8 Mg.ha<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2014).

El plátano desde el punto de vista social, está asociado al consumo nacional, que lo constituye en un producto tradicional incluido en la dieta básica del pueblo venezolano, por ser ingrediente indispensable de comidas criollas. Además, en el medio rural, gran cantidad de

familias tienen una dependencia directa o indirecta con este cultivo, que genera aproximadamente más de 150.000 empleos directos (Surga *et al.*, 1999).

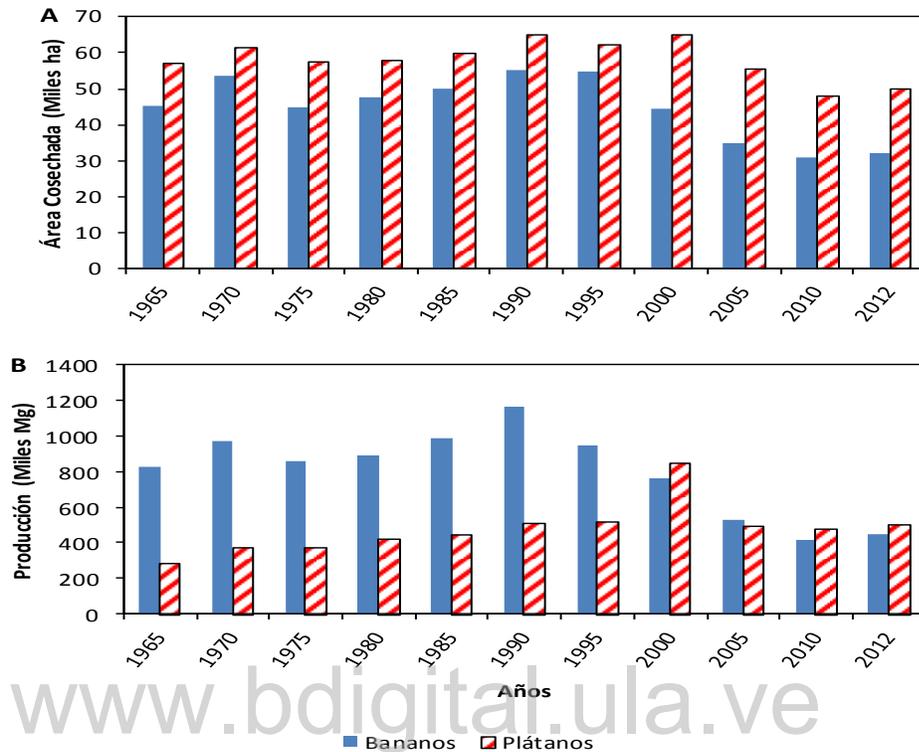


Figura I-1. Estadísticas anuales de área cosechada y producción de bananos y plátanos en Venezuela. A. Área cosechada y B. Producción. Se muestran valores cada cinco años y se incluye el año 2012. Fuente: FAOSTAT (2014).

En la Zona Sur del Lago de Maracaibo, principal área productora de plátano del país, este cultivo representa la segunda actividad económica, con una superficie sembrada del 55% del total nacional, involucrando alrededor de 5.000 familias productoras, donde el 60% de las fincas o parcelas tienen un tamaño inferior a las 10 hectáreas. Esta característica del sistema indica que los productores viven en las parcelas y ha propiciado que los asentamientos poblacionales estén dentro de la zona productora, que acentúa los problemas de salud pública relacionados con el uso de agroquímicos y posibles problemas con las fuentes de agua que proviene generalmente de pozos, pero lamentablemente no existen estudios de los niveles de contaminación en los trabajadores, sus familias y el ambiente (Nava, 2004; Abreu *et al.*, 2007).

Otro aspecto a considerar y que influye positiva o negativamente en la situación anterior es la diversificación del mercado. Como se observó en la figura I-1, es un cultivo que está en recuperación, de hecho el 70% del consumo nacional lo aporta esta región del Sur del Lago de

Maracaibo; además, el pujante crecimiento de la industria tostonera, ha incrementado la cantidad de empleos y otras oportunidades de negocio como las empresas, llamadas localmente maquiladoras (empresas que desconchan el plátano para esta industria) y otras empresas de servicios, por tal motivo esta situación motiva a expandir la oferta interna y externa, con la exigencia de aumento del área de siembra o mejoramiento del nivel tecnológico para aumentar los rendimientos (Nava, 2004; Abreu *et al.*, 2007).

### **1.1.3. El manejo del nitrógeno y sus consecuencias ambientales**

El uso de los fertilizantes es parte de un contexto agronómico más amplio, en el manejo de sistemas de cultivos, donde la producción agrícola convencional (sistemas de siembra, uso de híbridos o variedades) induce la aplicación de fertilizantes en forma continua y masiva, fundamentalmente de nitrógeno, fósforo y potasio (Ciampitti *et al.*, 2005; Bruulsema *et al.*, 2008; Acón-Ho *et al.*, 2013). Otro problema, es que las fuentes de fertilizantes no son eficientemente utilizadas por los cultivos. En el caso del nitrógeno (N), su absorción rara vez alcanza el 50% de la cantidad aplicada, presentándose altas pérdidas del sistema suelo-planta, lo cual disminuye la eficiencia económica de los cultivos (Prasertsak *et al.*, 2001), pudiendo producir cambios en la naturaleza de los suelos y riesgo de contaminación ambiental por lixiviación, emisiones gaseosas o elevación de la concentración de sales en los suelos y capas freáticas (Ciampitti *et al.*, 2005; Bruulsema *et al.*, 2008).

Particularmente, el N es el nutriente cuyo estudio ha recibido mayor atención en los agroecosistemas por su papel preponderante en los procesos de crecimiento y producción de las plantas; sin embargo, la IFA/FAO, reporta que la literatura agronómica sobre este elemento y sus pérdidas es abundante en regiones como Europa, Norte América, Australia, Nueva Zelanda y China, pero en otras regiones como Centro y Sur América, entre otras, no lo es tanto (Goulding, 2004; López-Hernández *et al.*, 2005).

Es necesario generar conocimientos sobre estudios del ciclo del nitrógeno y sus pérdidas en agroecosistemas tropicales, para mejorar la eficiencia de uso de fertilizantes, mejorar aspectos de aplicación, incorporar otras fuentes de nutrientes y por tanto disminuir los riesgos de daño ambiental, al mismo tiempo reducir los costos de la fertilización (Acón-Ho *et al.*, 2013).

En general, se reporta que las musáceas y particularmente el banano tienen altos requerimientos de nitrógeno, elemento que es importante por su rol en la fotosíntesis, en la respiración y muchos otros procesos metabólicos y fisiológicos. Sin embargo, debido a diversos

factores, las dosis aplicadas no son absorbidas y acumuladas en la biomasa, como lo indican Prasertsak *et al.* (2001) y Acón-Ho *et al.* (2013). Sansoulet *et al.* (2007) y Cattán *et al.* (2009), indican que en los trópicos (Caribe, Centro y Sur América, Camerún y Asia insular), los cultivos de banano, debido a su alto requerimiento, son localmente e intensamente fertilizados alrededor del tallo, con dosis sobre los 400 kgN.ha<sup>-1</sup> y 800 kgK.ha<sup>-1</sup> por ciclo. Prasertsak *et al.*, (2001), citan que en Australia y Costa Rica, el 100% de los cultivos son fertilizados con más de 500 kgN.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, pero en Nicaragua y Ecuador cerca del 75% son fertilizados con una dosis de alrededor de 300 kgN.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. En Venezuela, específicamente en el Sur del Lago de Maracaibo, la situación es similar, presentándose dosis anuales de alrededor de los 400 kgN.ha<sup>-1</sup>.

Por otro lado, la absorción de un cultivo de banano o plátano, con los rendimientos promedio actuales, no excede los 250 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. Estas altas entradas de N al agroecosistema y su baja eficiencia de uso, presuponen pérdidas del elemento a través de escorrentía, lixiviación, desnitrificación o volatilización, las cuales al final causan efectos desfavorables en el ambiente.

El conocimiento del ciclo del N, el correcto manejo de los fertilizantes nitrogenados que incluye prácticas para minimizar las pérdidas por lavado, escorrentía, volatilización y desnitrificación y mejorar la eficiencia de su uso, son fundamentales para salvaguardar la calidad del agua de capas profundas y cuerpos de agua, evitar daños a la capa de ozono y alcanzar el máximo beneficio económico en la actividad agrícola, siendo objeto de gran interés para la población, agricultores e institutos de investigación (Suárez *et al.*, 2003; Mosier *et al.*, 2004), esto es particularmente cierto, como indica Raphael *et al.*, (2012), las regiones tropicales húmedas, donde las plantaciones de banano, entre otros cultivos, están expuestas a condiciones de altas intensidades de precipitación, donde las pérdidas por lavado de N, pueden representar una tercera parte del N aplicado en el fertilizante.

Los daños por contaminación por exceso de nutrientes son evidentes en el sistema del Lago de Maracaibo afectado por problemas de eutrofización, llamado también proceso de envejecimiento, que se refiere al aumento de la productividad biológica en los lagos. En el de Maracaibo, se evidencia en la proliferación o crecimiento exagerado de algas verde-azules y la lenteja de agua (*Lemna* sp.), posiblemente a causa del incremento de la disponibilidad de nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno, procedentes de fuentes puntuales como los aportes de aguas residuales domésticas e industriales y no puntuales como la descarga de las actividades agrícolas y dispersantes de derrames petroleros (Morales *et al.*, 2006; Machado *et al.*, 2010b). Estos aportes no puntuales de origen agrícola, son de difícil control o simplemente no son

controlables por cuanto estas dependen del hombre, que las hacen ser generalmente eventos repentinos, por lo que es importante controlar la incorporación de estos contaminantes y al igual que los nitrogenados en el lugar de aplicación (Rodríguez, 2001; Muñoz, 2007; Marcano, 2007).

Las investigaciones sobre el uso de fertilizante nitrogenado en el agroecosistema plátano en el Sur del Lago de Maracaibo se ha limitado a ensayos de dosis de fertilizante y su respuesta en rendimiento, pero no se ha estudiado sobre su distribución en los diferentes procesos del ciclo del nitrógeno y no se conocen las pérdidas a través de cualquiera de las vías, ya sean gaseosas o por lavado, información básica necesaria para establecer las limitaciones en el sistema y buscar estrategias para optimizar los procesos. Además, resulta interesante estimar cuál es la contribución a la problemática de la contaminación del Lago de Maracaibo, producto de las pérdidas del N aplicado a las vastas extensiones cultivadas con plátano en la zona.

## **I.2. Marco conceptual y antecedentes**

El conocimiento de los balances hídricos y de nutrientes, junto con el de crecimiento del cultivo en los agroecosistemas y sus interacciones en el tiempo, son fundamentales para descifrar su funcionamiento y son la base para la construcción de modelos de simulación que contribuyan a establecer o mejorar alternativas para el manejo integrado de los mismos, favoreciendo la sustentabilidad de la actividad agrícola desde el punto de vista social, económico y ambiental.

### **I.2.1. El enfoque agroecosistémico**

El agroecosistema es un concepto complejo de abordar, por lo tanto en principio es pertinente indicar que se deriva de los vocablos agro por agronomía, que estudia la actividad agrícola, y ecosistema, referido al conjunto de componentes bióticos y abióticos que interactúan a través del intercambio de energía, agua y nutrientes (Moreno, 2010). En otras palabras, el enfoque agroecosistémico consiste en aplicar los enfoques, conceptos y metodologías de la ecología de ecosistemas al estudio de ese tipo particular de ecosistema modificado y controlado por el hombre que son los sistemas agrícolas y pecuarios.

El agroecosistema es conceptualizado dependiendo del interés del autor, a continuación se presentan varios ejemplos: Odum (1972), lo definió como un ecosistema modificado por el hombre, en el que la diversidad de especies se transforma y se distribuye con el fin de hacer eficiente la captación de diversas formas de energía que entran al sistema, con el fin de lograr excedentes para satisfacer necesidades humanas; por su parte Hart (1979), lo interpreta como un

ecosistema que cuenta por lo menos con una población de utilidad agrícola y se encuentra regulado por la intervención del hombre a través de un manejo dirigido a alcanzar los objetivos que se planteen; Altieri (1999), plantea que es una entidad real, pero también un modelo teórico conceptual, que se puede utilizar como herramienta teórica metodológica, para su diseño y manejo sustentable; Gliessman (2002) lo ve como el sitio de producción agrícola producto de las modificaciones realizadas por el hombre y que ofrece un marco de referencia para analizar sistemas en su totalidad que incluyen el conjunto de entradas, salidas y las interacciones entre sus partes y González (2011), indica que es una parte de la naturaleza que puede ser reducida a una unidad con arquitectura, composición y funcionamiento propios con límites arbitrarios reconocibles, que permite determinar las entradas y salidas de materiales desde una perspectiva agronómica. En resume, el agroecosistema es considerado como la unidad que representa una realidad compleja de todas aquellas actividades que se desarrollan para la producción de bienes y servicios agrícolas, donde existe intercambio de energía e interrelaciones entre los componentes que lo integran, con límites definidos y sirve además como base conceptual, teórica y metodológica para abordar estudios desde el enfoque de sistemas (Palomares, 2010).

Conway (1986) y Bawden e Ilson (1992) citados por Vélez (2004), plantean que el desarrollo del análisis agroecosistémico ha surgido en respuesta a la complejidad de los problemas de la agricultura contemporánea (tales como contaminación, plagas, salinización, incremento de la inequidad, entre otros) y el reconocimiento de que estos problemas son complejos y esencialmente sistémicos, que interactúan entre sí por procesos agroecológicos y socioeconómicos básicos, producidos en muchos casos por inapropiado manejo de los procesos y de tecnología introducida. Plantear el proceso productivo con este enfoque conlleva, según Vélez (2004), a la necesidad de hacer translúcida la caja negra o agroecosistema, que permita conocer los flujos de energía, ciclaje de nutrientes, balance hídrico, entre otros e incluir el concepto de utilidad para el hombre (Hart, 1979), esta idea implícita en las investigaciones agroecológicas, de entender las relaciones y procesos ecológicos, permite que los agroecosistemas puedan ser manejados para mejorar la producción de forma sustentable, con menores impactos negativos ambientales y sociales y un menor uso de insumos externos con la identificación de las prácticas agrícolas que favorezcan la sustentabilidad.

En este sentido, uno de los problemas que se presenta en los agroecosistemas es el reciclaje de nutrientes que puede ser mínimo, debido a la salida por la cosecha o como resultado de la percolación o erosión que ocurre por la constante reducción de los niveles de biomasa

persistente en el sistema, como ocurre en los sistemas de monocultivo, donde la degradación del suelo puede llegar a niveles de infertilidad, por la salida de los nutrientes del sistema debido a la falta de materia orgánica que los retenga en el suelo. Bajo este escenario, la agricultura moderna se apoya en ingresos de insumos en forma de nutrientes (fertilizantes), para reemplazar estas pérdidas, que contaminan el ambiente por su uso constante al tratar de mantener los rendimientos de los cultivos; por tal razón, es prioritaria la práctica de una agricultura sustentable de fácil implementación, de acuerdo a las condiciones de vida y de los recursos disponibles por los agricultores, que abarcan el aspecto socioeconómico del sistema que debe llegar hasta el consumidor (Gliessman, *et al.*, 2007; Moreno, 2010).

Para un adecuado análisis de la agricultura actual desde el punto de vista agroecológico, en aras de mejorar el manejo de los agroecosistemas, como indica Ruiz-Rosado (2006), es imprescindible identificar y tomar en cuenta el papel que desempeña cada elemento o proceso (ciclos biogeoquímicos, transformaciones de la energía, procesos biológicos, entre otros) dentro del agroecosistema y la racionalidad de su manejo, por medio de la generación del conocimiento y metodologías adecuadas para desarrollar una agricultura que por un lado sea ecológicamente buena, presente alta productividad y resulte económicamente viable (Gliessman, 2002).

www.bdigital.ula.ve

### **1.2.2. Balance hídrico del agroecosistema**

El balance hídrico del agroecosistema constituye uno de los aspectos más importantes de su funcionamiento, debido a que gran parte de los procesos están vinculados directa o indirectamente a la dinámica hídrica, que no sólo determina la economía hídrica de la vegetación, sino además condiciona la economía del carbono y de los nutrientes minerales que suelen ser las principales limitantes para el crecimiento y producción (Acevedo y Sarmiento, 1990; Ataroff y Sánchez, 2000; Tesón, 2011). Existe además un interés ambiental ya que la conversión de los ecosistemas a sistemas de monocultivo, pueden generar impactos adicionales por la pérdida de biodiversidad, afectación de los ciclos del agua y nutrientes, al provocar modificación del escurrimiento superficial por efecto del cambio de la cobertura de los suelos y reducción de la disponibilidad de nutrientes por el consumo y exportación con la cosecha (Tesón, 2011).

El agua se moviliza hacia, dentro y desde los sistemas ecológicos siguiendo vías o flujos característicos que conforman el ciclo (figura I-4) y el balance hídrico a nivel de los ecosistemas o agroecosistemas está dado por la diferencia de ingresos y egresos. El objetivo principal de este balance es determinar la dinámica espacial y temporal del agua en su paso a través, en nuestro

caso, del agroecosistema plátano, que puede ir cambiando en la medida que el cultivo crece, ya que ciertos flujos pueden ser favorecidos por la conformación y disposición de estructuras o la distribución de los residuos sobre el suelo.

El conocimiento de los flujos de agua a través del agroecosistema (entradas, transferencias y salidas), su influencia en la actividad de los procesos bióticos y abióticos y la comprensión de los mecanismos que regulan su funcionamiento, permite establecer alternativas para modificar situaciones desfavorables para el sistema o con la información obtenida se construyen modelos de simulación de la dinámica, para evaluar las alternativas de manejo y ponerlas a disposición de los productores en el futuro cercano (Ataroff y Sánchez, 2000).

La identificación de los compartimientos y procesos de transferencia de agua en el agroecosistema depende de los objetivos y alcances de la investigación, en general los flujos que conforman el balance hídrico son: precipitación y riego como entradas, interceptación, precipitación neta e infiltración como transferencias y como salidas tenemos la evapotranspiración (evaporación y transpiración), drenaje y escorrentía. Como compartimientos podemos diferenciar el agua almacenada en el dosel y aquella que es almacenada en el suelo. Ambos compartimientos son susceptibles de ser analizados en capas.

www.bdigital.ula.ve

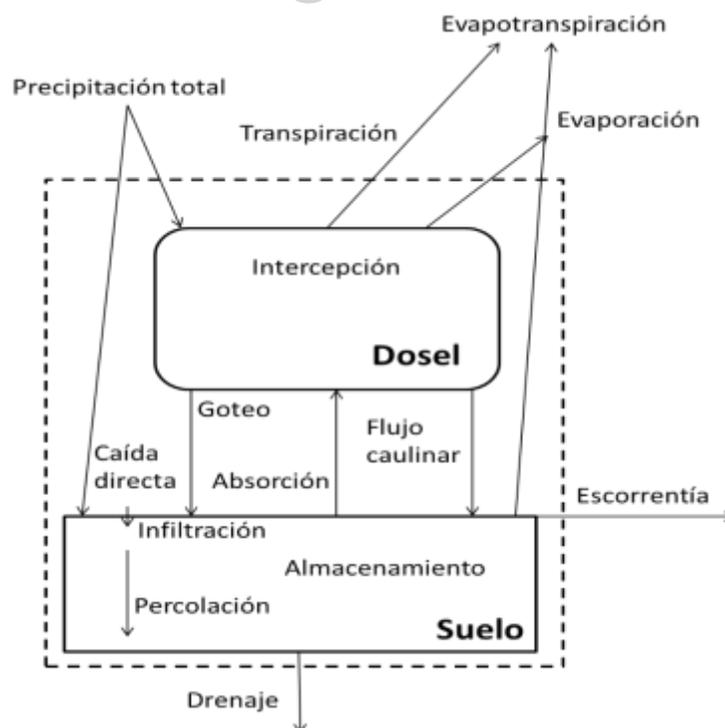


Figura I-2. Esquema de los compartimientos y procesos involucrados en el balance hídrico de un ecosistema.

El agua que ingresa a los ecosistemas cae ya sea directamente sobre el suelo o sobre la vegetación, la cual tiene la propiedad de actuar como barrera, afectando su velocidad y distribución bajo el área que cubre. La lluvia no solo constituye un aporte de agua, además como solvente universal arrastra elementos minerales existentes en la atmósfera y el aire al interior de los ecosistemas, cuya cantidad varía en función de la ubicación geográfica, época del año, cantidad de partículas existentes en la atmósfera, nivel de contaminación, etc. (Grimm y Fassbender, 1981; Andrade *et al.* 1995).

El agua de precipitación que no llega al suelo es el flujo de intercepción que se produce por la captación del dosel de las plantas y reingresa a la atmósfera por evaporación; la intercepción es afectada significativamente por la distribución, duración y volumen de la precipitación y la arquitectura de la planta (Bassette y Bussière, 2008; Calvo-Alvarado *et al.*, 2012). Acevedo y Sarmiento (1990) y Bassette y Bussière (2008), indican que es también afectada por la edad y la inclinación de la hoja, disminuyendo la intercepción al aumentar la senescencia y la inclinación.

Andrade *et al.* (1995) en Brasil, con plantaciones de eucalipto, midieron 13,7% de intercepción; Ataroff y Sánchez (2000), reportan para un bosque siempre verde seco una intercepción alta, del 27%, 19% en un cultivo de manzanos, 17% para hortalizas (rotación de apio-zanahoria-papa) y 20% para un pastizal. La menor intercepción en el sistema hortícola se debe a la menor biomasa aérea y cobertura.

El agua de lluvia puede alcanzar la superficie del suelo (precipitación neta) por dos vías: directamente sin tocar la vegetación o desde la vegetación, esta última puede gotear desde las hojas o escurrir por la superficie de los tallos (flujo caulinar), llegando al suelo con una distribución irregular.

El flujo caulinar es un proceso ecohidrológico que tendrá importancia dependiendo del tipo de follaje que caracteriza a los ecosistemas forestales y agrícolas, Hofhansl *et al.* (2012) reporta para bosques tropicales un rango entre <1 a 23%, que causa una entrada de agua en el suelo localizada espacialmente en la base de las plantas, que influye en la recarga subterránea del agua (Cattan *et al.*, 2007a; Sansoulet *et al.*, 2008; Macinnis-Ng *et al.*, 2012).

Calvo-Alvarado *et al.* (2012), en una sucesión temprana, intermedia y tardía de un bosque húmedo tropical en Costa Rica, presentan resultados del flujo caulinar de 7,6% de la precipitación total para la sucesión temprana y de 3,8% para las demás, indicando que la diferencia es producto de las características morfológicas entre las especies presentes, además indican que estos

resultados son mayores a los de otros bosques, principalmente debido a la diferencia en las intensidades de las lluvias, producto de que a mayor intensidad se favorece el flujo de goteo+caída directa en detrimento del flujo caulinar. En plantaciones de eucalipto en Brasil, Andrade *et al.* (1995) obtuvo 8,1% y en Argentina Tesón (2011) reporta entre 3,8 y 5,2% de la precipitación total, por su parte, Cattán *et al.* (2007a), en banano con un LAI bajo, en estado vegetativo, obtuvo 18% y con un LAI alto, en estado tanto vegetativo como en producción obtuvo 26 y 24% respectivamente, estos valores altos fueron calculados con la metodología propuesta por Herwitz (1982), que considera el flujo caulinar expresado como una proporción de la velocidad de escurrimiento del agua por elseudotallo y la tasa de la lluvia total.

De la precipitación neta que alcanza la superficie del suelo, una parte corre superficialmente por el suelo (escorrentía) y otra penetra dentro del perfil del suelo (infiltración). De esta última una parte es retenida temporalmente como humedad del suelo, parte se evapora directamente y otra parte se desplaza hacia capas profundas (percolación). Finalmente del agua retenida en el suelo, una parte es absorbida por las raíces y retorna a la atmósfera como vapor de agua por el proceso de transpiración (Grimm y Fassbender, 1981; Jaramillo-Robledo, 2005; Sansoulet *et al.*, 2008).

La escorrentía superficial, en terrenos planos o de muy baja pendiente puede ser escasa y no constituir pérdida o ganancia significativa, así lo reportan Acevedo y Sarmiento (1990), en sus resultados en una parcela de maíz-barbecho con baja pendiente en los Llanos venezolanos, donde observaron una evidente dependencia de la escorrentía con la precipitación total, que resultó muy baja, por el orden del 2% de la precipitación total.

El drenaje es el agua que sale del sistema al traspasar su límite inferior, que generalmente se considera la profundidad radicular (Khanna, 1981). Los flujos de percolación en el suelo corresponden al flujo de agua a través de la zona no saturada del suelo, que se convierte en un importante factor de recarga del agua subterránea al atravesar el límite del sistema. La percolación es controlada por varios factores como la condición inicial del agua en el suelo, propiedades hidráulicas, microtopografía y la vegetación, estas últimas también afectan los flujos de escorrentía cuando se presentan (Cattán *et al.*, 2007b; Cattán *et al.*, 2009).

La vegetación actúa sobre el agua de dos formas, la primera, por el sistema radicular que ejerce succión sobre el suelo, extrayendo agua y la segunda, el follaje que intercepta parte de la lluvia, la cual es redistribuida por el flujo caulinar, el goteo y almacenada en las estructuras, que de

acuerdo a la planta y al clima causa gran heterogeneidad en los patrones de distribución sobre la superficie del suelo (Cattan *et al.*, 2007b; Cattan *et al.*, 2009).

Para el caso de las musáceas comestibles (bananos, plátanos y topochos), por ser cultivos donde el agua es el principal factor no biológico, que en exceso o deficiencia limita su producción (Martín-Prevel, 1979; Turner, 1996), es un factor determinante para la mayoría de los cultivares comerciales que son muy sensibles a los cambios de humedad que limitan la expresión de su potencial genético. El déficit de agua, afecta procesos importantes como la conductancia estomática y la fotosíntesis, la disponibilidad de carbohidratos que se traduce en retardo en la emisión foliar, reducción de su tamaño e incremento de la senescencia de las hojas; si este déficit ocurre al momento de la diferenciación floral o inicio de la floración se reduce drásticamente el rendimiento del cultivo (Krishna *et al.*, 2013). Por otra parte, el exceso de agua (sobresaturación del suelo) por más de tres días causa la necrosis de las raíces afectando el transporte de agua y nutrientes, la planta se torna amarillenta indicando un inicio prematuro de senescencia de los órganos aéreos donde las hojas pierden turgencia y se doblan (Belalcázar, 1991; Rodríguez, 2009), por lo tanto es fundamental disponer de información de volúmenes y movimiento del agua en el agroecosistema.

Los mayores esfuerzos para la determinación de balances hídricos o algunos de sus flujos en bananos se han realizado por Prasertsak *et al.* (2001), Ruy *et al.* (2005), Sansoulet *et al.* (2007), Cattan *et al.* (2006) y Cattan *et al.* (2007 a y b) en Australia y Guadalupe. Estos autores encuentran que la escorrentía en suelos volcánicos del orden andosoles, sembrados con plantas de banano, se vio influenciada por la intensidad y volumen de los eventos de lluvia (características pluviométricas) y por las condiciones iniciales de humedad del suelo.

Cattan *et al.* (2007b), evaluaron el flujo de percolación debajo de la planta de banano y entre las plantas de banano, en una zona con un promedio anual de precipitación de 3850 mm, con lisímetros abiertos con y sin tensión. Los lisímetros con tensión consisten en la colocación de una capa de fibra de vidrio en el interior del lisímetro, que genera una tensión de 0 – 5 kPa y el lisímetro sin tensión no la incluye. Por lo tanto, concluyen que los flujos observados en ambos lisímetros deben ser considerados en términos relativos, como los límites superior e inferior del flujo de percolación real.

Finalmente, observaron que los flujos de percolación, independientemente del tipo de lisímetro, fueron mayores bajo la planta, alcanzando valores anuales de 10.890 mm y 1.499 mm para los lisímetros con y sin tensión respectivamente, que entre las plantas con valores de 5.226

mm y 221 mm; así mismo, acotan que la arquitectura de la planta tiene alta influencia en este comportamiento del flujo de percolación, debido a la concentración del agua que realiza el flujo caulinar, junto con la intensidad de las lluvias y la humedad del suelo (Cattan *et al*, 2007a, b).

En las investigaciones anteriores, se llega a la conclusión que el flujo caulinar es una vía importante de canalización del agua de lluvia en el cultivo de banano, que puede llegar al 26% de la precipitación total y puede propiciar las pérdidas por lixiviación o escorrentía de agroquímicos cuando la aplicación de estos últimos coincide con un evento de precipitación y sobre todo cuando se realiza alrededor del seudotallo.

### **I.2.3. Balance de nitrógeno del agroecosistema**

En los ecosistemas terrestres en general, la entrada de elementos desde la atmósfera y la litosfera representa un aporte nuevo para el crecimiento de las plantas; sin embargo, a causa de la retención y reciclado interno, la tasa anual de producción primaria neta no depende únicamente de los aportes nuevos al sistema, de hecho la circulación anual de elementos importantes como el nitrógeno, dentro de un ecosistema, es a menudo de 10 a 20 veces superior a la cantidad recibida desde el exterior del sistema (Likens y Borman, 1977 citado por Sarmiento, 1984).

La transformación de ecosistemas a agroecosistemas provoca cambios en la dinámica de los nutrientes (Tesón, 2011), su estudio en general utiliza el cálculo de flujos de nutrientes y balances en los sistemas agrícolas para mejorar la comprensión del manejo de nutrientes y contaminación ambiental; que han demostrado ser una valiosa herramienta para evaluar la sostenibilidad de los agroecosistemas y para proporcionar información de los cambios en la productividad en el tiempo (Ndabamenye *et al.*, 2013).

La dinámica del nitrógeno en un agroecosistema ha sido de gran interés debido al relevante papel que juega en la nutrición de las plantas y la producción agrícola y la importancia del uso racional y efectivo del mismo (Bolado *et al.*, 2003). El balance de nitrógeno que es un concepto más general, que se basa en el ciclo del nitrógeno, implica el cálculo de las diferencias entre entradas y salidas en un sistema de cultivo, mediante el cual un valor negativo señala agotamiento y un valor positivo acumulación de nitrógeno (Thieuleux, 2006; Ndabamenye *et al.*, 2013).

En la figura I-3, se observa un esquema del ciclo del nitrógeno de un agroecosistema con las diferentes entradas, transferencias y salidas. Las entradas están representadas por el nitrógeno proveniente de la deposición seca, aerosoles, precipitación o deposición húmeda, fertilizante,

fijación simbiótica y libre; las transferencias son el pluviolavado, absorción, mortalidad, descomposición, inmovilización, mineralización, humificación y las salidas corresponden al lavado, erosión, escorrentía, volatilización, desnitrificación y cosecha.

En los agroecosistemas no todos los flujos del ciclo del nitrógeno están presentes, por ejemplo la fijación simbiótica es realizada en sistemas asociados con leguminosas o por la inoculación de las plantas con *Rhizobium* (Thieuleux, 2006; González y Cuenca, 2008).

La concentración de nutrientes en la lluvia a campo abierto es normalmente más baja que después de atravesar el dosel de la vegetación, lo que sugiere que ocurre un lavado de nutrientes desde las hojas u otras estructuras aéreas. Los nutrientes contenidos en el pluviolavado pueden provenir de la deposición seca (polvo) o bien de la biomasa aérea, los mismos finalmente terminan en el suelo; este parámetro, también es influenciado por la localización geográfica del lugar o por corrientes aéreas, marinas, volcánicas y concentraciones urbanas e industriales (Andrade *et al.*, 1995) así como por la fisiología de la planta. Zaltauskaité y Juknys, (2011) y Macinnis-Ng *et al.*, (2012), además indican que la concentración de nutrientes en los flujos de goteo y flujo caulinar depende del volumen, intensidad y duración de la lluvia, la composición de la vegetación y el estatus nutricional de la misma.

La fertilización igualmente depende de las condiciones edáficas, tipo de fertilizante o abono, el cultivo y el sistema de producción que interacciona a nivel del suelo en los flujos de inmovilización-mineralización.

Así mismo, el nitrógeno se distribuye en el perfil del suelo, gracias a que el agua es un importante agente transportador de nutrientes en solución y suspensión, dependiendo del volumen y conociendo la concentración de nitrógeno, se establecen las transferencias de nutrientes (N) en los agroecosistema (Sarmiento y Acevedo, 1991; Boaretto *et al.*, 2008).

Las transferencias de nitrógeno en el ciclo están conformadas por el pluviolavado que es una transferencia desde el dosel hasta el suelo a través del arrastre que hace el agua de lluvia de N en forma soluble, que se refleja en los flujos de goteo y flujo caulinar. La absorción de nitrógeno por la plantas se efectúa por varios mecanismos como la intercepción, difusión y flujo de masa, donde el último es el más importante; estos mecanismos están regulados por varios factores como las propiedades del suelo, requerimientos y tipo de planta, entre otros (Marschner, 1997).

El nitrógeno orgánico puede representar del 97 al 98% del total de nitrógeno en el suelo, mientras que el nitrógeno inorgánico generalmente representa sólo del 3 al 2%, por lo tanto, el proceso que convierte las formas orgánicas de nitrógeno no disponibles a formas disponibles son

importantes para el crecimiento de las plantas. La descomposición de los residuos de cultivo es una fuente importante de reciclaje de nutrientes.

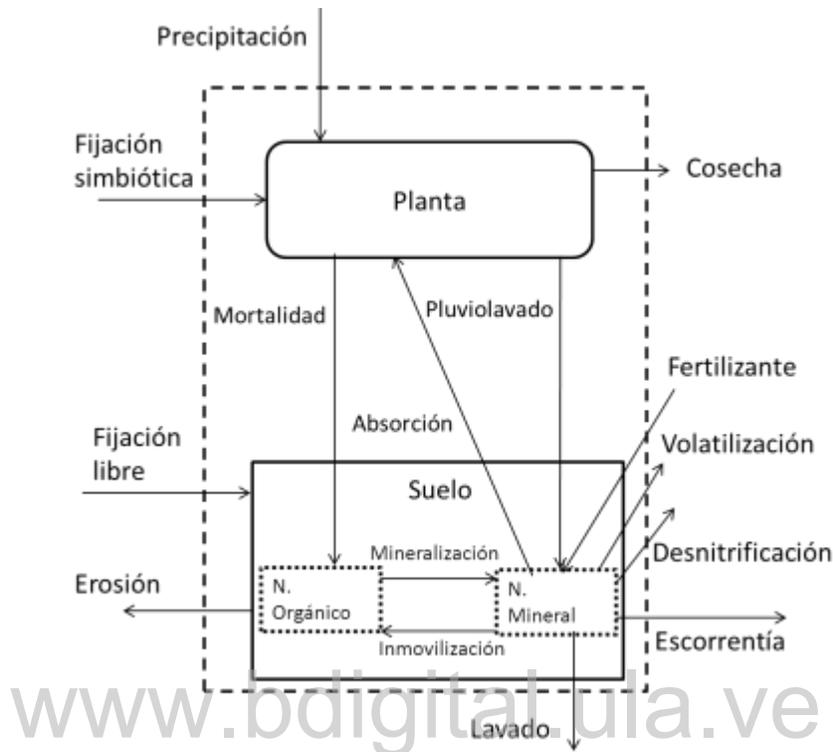


Figura I-3. Ciclo del nitrógeno de un agroecosistema.

La mineralización del nitrógeno de la materia orgánica por descomposición comienza con la liberación del  $\text{NH}_4^+$  por los microorganismos heterótrofos. Este proceso se denomina amonificación. Varios procesos subsiguientes afectan la concentración de  $\text{NH}_4^+$  en la solución del suelo, tales como: absorción por las plantas, inmovilización por los microorganismos y fijación en minerales arcillosos. Parte del amonio restante puede sufrir el proceso de nitrificación en el cual el  $\text{NH}_4^+$  se oxida a  $\text{NO}_3^-$  en presencia de bacterias quimioautótrofas de los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. A su vez el nitrato puede ser absorbido por las plantas, sufrir un proceso de desnitrificación por el cual escapa a la atmósfera o perderse por escorrentía o drenaje. El nitrato puede ser inmovilizado por los microorganismos y reducido a  $\text{NH}_4^+$  por la nitrato reductasa y utilizado para el crecimiento bacteriano (inmovilización), este proceso se denomina reducción asimilatoria (Schlesinger, 2000).

La inmovilización es el proceso a través del cual amonio, nitrato y otros compuestos orgánicos simples de nitrógeno son asimilados por la biomasa microbiana del suelo para

convertirlos en sustancias complejas durante la oxidación de sustratos. Sin embargo, el nitrógeno inmovilizado quedará disponible para su mineralización a medida que se agota el sustrato y por ende decae la población microbiana. Si la diferencia entre mineralización e inmovilización es positiva se habla de mineralización neta y si es negativa se habla de inmovilización neta (Ortega y Mardoñez, 2005).

Las salidas de nitrógeno del sistema que faltan por comentar son aquellas que no presentan el agua como vehículo de salida, que están representadas por la volatilización, desnitrificación y cosecha. La volatilización del nitrógeno es el proceso a través del cual el amonio del suelo o el amonio de los fertilizantes pueden irse a la atmósfera. Este proceso tiene relevancia cuando se usan fuentes de fertilización amoniaca y particularmente cuando los estudios tienen relación con la aplicación de urea a los suelos. Se ha demostrado que este proceso está influenciado por numerosos factores edáficos tales como: pH, contenido de carbonato de calcio, capacidad de intercambio catiónico, textura, temperatura, contenido de humedad, cantidad y formas de amonio, de las condiciones climáticas como precipitación y temperatura. En relación con el fertilizante depende de la fuente, la dosis y la profundidad de incorporación (Prasertsak *et al.*, 2001; Barbieri y Echeverría, 2003).

El proceso de volatilización puede describirse a través de la siguiente ecuación:



Las pérdidas por volatilización son favorecidas particularmente por un valor de pH alto en el suelo o bien por reacciones que produzcan un aumento del pH aun en forma transitoria (Videla, 1994).

Por su parte, la desnitrificación es un proceso de reducción biológica realizado en el suelo por un gran número de microorganismos anaerobios facultativos. En condiciones de anaerobiosis, estos microorganismos utilizan el  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  en lugar del  $\text{O}_2$  como aceptores de electrones, produciendo dos formas gaseosas de nitrógeno  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{N}_2$ . Este proceso se puede expresar en la siguiente ecuación (Knowles, 1982):



Los microorganismos desnitrificadores compiten con los cultivos para la utilización del  $\text{NO}_3^-$  y las pérdidas por esta vía pueden llegar a representar un 30% del N agregado por fertilización en ciertos agroecosistemas (Hauck, 1981). La desnitrificación es influenciada por factores como la materia orgánica, temperatura, condiciones anaeróbicas y pH (Knowles, 1982).

Como refieren López-Hernández *et al.* (2005), los conocimientos que permitan avanzar en el entendimiento del ciclo del nitrógeno en los agroecosistemas son muy importantes, por el valor que representa la información generada, junto a otros conocimientos, en la planificación, uso eficiente y no contaminante, que repercutirá en efectos positivos en el ambiente energético, económico y social, al modificar o crear mejores prácticas de manejo.

En el tabla I-1, se presenta el balance de nitrógeno de dos variedades de caña de azúcar presentado por López-Hernández *et al.* (2005), donde se observa que con iguales entradas de nitrógeno el balance final resulta contrastante debido al efecto de una práctica de manejo (quema) y mayor rendimiento. Estrada *et al.* (2005), compara dos sistemas de drenaje también en caña de azúcar donde el drenaje subterráneo obtuvo un balance más negativo que el drenaje superficial por efecto de una producción 130% superior, producto del mejoramiento de las condiciones de humedad del suelo, manteniendo un equilibrio en los flujos de pérdida de nitrógeno (tabla I-2).

Tabla I-1. Balance de N ( $\text{KgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) de dos variedades de caña de azúcar en Venezuela. López-Hernández *et al.* (2005).

Variedad	Entradas			Salidas			Balance	
	Ferti.	Preci.	Fijac.	Cosecha	Quema	Lixiv.		Volat.
Puerto Rico 1028	235	26,3	3,4	140	106	5,3	30,7	-17,3
Venezuela 58-4	235	26,3	3,4	103	63	5,3	30,7	+62,7

Ferti: fertilización; Preci: precipitación; Fijac: fijación simbiótica; Lixiv: lixiviación; Volat: volatilización.

El reciclaje de nutrientes vía incorporación de necromasa al suelo y su posterior descomposición en cultivos de banano es muy dinámico, debido al gran volumen de biomasa y el relativamente bajo índice de cosecha; sin embargo, existen pocos conocimientos cuantitativos en términos de los flujos de nutrientes y los balances en estos sistemas (Nyombi *et al.*, 2010).

Zotarelli *et al.* (2007), indican que en los campos agrícolas la pérdida de nitrógeno por lixiviación es considerada como una de las mayores contribuyentes de contaminación del agua subterránea, que está influenciada por los regímenes de precipitación, láminas de riego aplicadas y el cultivo. A esta misma conclusión llegó Muñoz-Carpena *et al.* (2002), en una plantación de banano en las Islas Canarias, donde el 48% ( $202 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) del nitrógeno total aplicado no fue utilizado por la planta, pero llegó al acuífero; el balance mensual de nitrógeno, determinó que esta pérdida se debe a la excesiva fertirrigación que coincidió con eventos de lluvia o riego, además de

las altas dosis aplicadas, el cultivo presentó una absorción casi continua durante la investigación asociada a las aplicaciones de fertilizante y que alcanzó a  $199,14 \text{ kgN.ha}^{-1}$  que representó el 40% de lo aplicado y en el suelo quedó el restante 12%.

Tabla I-2. Balance de N ( $\text{KgN.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ ) en caña de azúcar bajo dos sistemas de drenaje en México. Estrada *et al.* (2005).

Drenaje	Entradas		Salidas					Balance
	Ferti.	Preci.	Escor.	Volat.	Cosec.	Desni.	Lixiv.	
Superficial	120	17,63	9,78	26,69	94,99	12,52	2,86	-9,21
Subterráneo	120	17,22	2,50	23,22	215,84	11,71	9,13*	-124,77

\*se incluye la salida por lavado de  $0,97 \text{ KgN.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  +  $1,54 \text{ KgN.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  de la descarga del drenaje subterráneo. Ferti: fertilización; Preci: precipitación; Escor: escorrentía; Volat: volatilización; Cosec: cosecha; Desni: desnitrificación; Lixiv: lixiviación.

Sin embargo, Prasertsak *et al.* (2001) en Australia, con el mismo cultivo, muestran que luego de 40 días de aplicado el nitrógeno en forma de urea, el 60 % estaba en el suelo, el 15% había sido recuperado en la planta, el 5% se perdió por lixiviación y sugieren que el 20% restante, fue perdido del sistema por escorrentía, volatilización o desnitrificación. En general, los autores concluyen que la eficiencia del uso de fertilizante en el cultivo de banano es muy baja comparada con la de otros cultivos.

Thieuleux (2006), presenta un balance de nitrógeno mineral para banano en Martinica (tabla I-3) donde obtuvo un balance cero entre las entradas y salidas evaluadas, y el principal flujo de salida fue la lixiviación, mientras que la escorrentía resultó baja, debido a que incluye el total de nitrógeno absorbido por la planta donde realmente solo se exporta el nitrógeno contenido en el racimo y también incluye como salidas los restos o necromasa de la planta al final del ciclo que realmente quedan en la superficie del suelo para el reciclaje de nutrientes para el siguiente ciclo de producción.

Considerando los aspectos anteriormente discutidos sobre la distribución del agua y las pérdidas de nitrógeno, Muñoz-Carpena *et al.* (2002) reportan que las mismas se concentran en períodos de precipitación y riegos intensivos, bajo el tallo de la planta de banano, donde las pérdidas pueden llegar a 5 ó 10 veces más que las obtenidas entre las hileras, ocasionado por el flujo del tallo que resulta en mayor lavado de nutrientes (Sansoulet *et al.*, 2007). Por lo que se deben revisar las prácticas de fertilización desde el punto de vista de la cantidad, sincronización y técnicas de aplicación para el control de la contaminación.

Tabla I-3. Balance de nitrógeno mineral ( $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) en banano. Thieuleux (2006).

Cultivo	Entradas		Salidas					Balan.	
	Ferti.	Rest.	Miner.	Escor.	Planta	Inmov.	Lixiv.		Rest.
Banano	370	40	286	8	145	74	112	357	0

Ferti: fertilización; Rest: restos antes y al final del ciclo del cultivo; Miner: mineralización; Escor: escorrentía; Planta: absorción por la planta; Inmov: inmovilización de nitrógeno; Lixiv: lixiviación; Balan: balance.

#### I.2.4. Modelos de simulación de cultivos y experiencias en musáceas

##### I.2.4.1. Los modelos de simulación y su aplicación en la agricultura

Los modelos de simulación son una representación simplificada de un sistema, donde se describen las variables dependientes e independientes de interés, características y restricciones mediante símbolos, diagramas y ecuaciones para su construcción, estos asumen diferente grado de complejidad en la simulación del sistema, dependiendo de los objetivos planteados. La amplia investigación en este tema se debe a que no solo permite imitar la realidad, sino porque se puede simplificar, estudiar, identificar o pronosticar en base a los procesos más importantes (Doorembos y Kassam, 1979; De Wit, 1986; Candelaria *et al.*, 2011).

La construcción de modelos para las plantas se puede realizar por medio de dos tipos de aproximación uno descriptivo y/o empírico y otro explicativo y/o mecánico; los modelos descriptivos como su nombre lo indica describen lo que pasa, sin preocuparse cómo pasa, se ignora el funcionamiento biológico y no se explican los procesos por los cuales la planta responde al ambiente, lo que resulta en una aproximación de caja negra, por lo tanto los sistemas y su comportamiento son descritos al mismo nivel al cual las observaciones son hechas, se identifican variables significantes del problema y se realiza un proceso matemático y estadístico para encontrar relaciones que representen adecuadamente la característica seleccionada de la planta con los parámetros considerados (De Wit, 1986).

Los modelos mecánicos son más complejos ya que intentan describir los posibles mecanismos de los procesos internos, sus interacciones bajo un concepto de relaciones causa-efecto y los parámetros que los gobiernan; en este sentido, la construcción del crecimiento de la planta se realiza sobre el conocimiento de los procesos fisiológicos, físicos, químicos y el efecto de los factores ambientales sobre estos. La mayor ventaja de los modelos mecánicos es que ellos pueden ser transferidos a otro conjunto de condiciones y ofrecen más posibilidades para manipular, mejorar el sistema y construir escenarios (De Wit, 1986; Link, 2005).

Por otro lado los modelos pueden ser clasificados como determinísticos o estocásticos. Los modelos determinísticos siempre dan el mismo resultado una vez que los datos de entrada y

las relaciones en el sistema son especificados al inicio y siempre que no se cambien los parámetros de entrada; no incluyen fuentes de variación estocástica. Los modelos estocásticos se realizan considerando que al menos uno de los parámetros que define el comportamiento del sistema es aleatorio y entonces el resultado es al menos en parte variable (Candelaria *et al.*, 2011).

Link (2005) distingue entre modelos funcionales y los orientados en procesos. Los modelos funcionales son definidos como una aproximación simplificada para describir procesos complejos, requieren pocos parámetros, son fáciles de usar, robustos, pero los resultados son menos precisos, aunque pueden ser tan buenos como los resultados obtenidos de modelos mecanísticos según el criterio de simplificación utilizado (Brisson *et al.*, 1998; Link, 2005). Los modelos basados en procesos fueron desarrollados para simular sistemas complejos, como los sistemas de cultivos, que presentan relaciones con el clima, suelo, manejo agrícola, entre otros, por lo que contiene combinaciones de diferentes tipos de modelos (Stockle *et al.*, 2003; Link, 2005).

Los modelos relacionados con procesos agrícolas y ambientales, han cobrado un gran auge en décadas recientes por la importancia de la agricultura en el desarrollo de la humanidad y conservación de los recursos naturales y cada día incrementan su reconocimiento como importantes instrumentos para su representación, estudio y planeación, en aras de obtener una producción optimizada, eficiente y sustentable (Candelaria *et al.*, 2011), esto se debe a que en diferentes situaciones es más fácil trabajar con los modelos que con los sistemas reales, debido a que el sistema en estudio puede ser muy grande y complejo, por limitaciones de recursos humanos y económicos, por la imposibilidad de experimentar en los sistemas o efectuar monitoreo frecuente; sin embargo, para que los modelos puedan ser usados necesitan ser adecuadamente validados bajo diferentes condiciones, dada la gran heterogeneidad climática y espacial de las zonas productoras de alimentos (Malone y Ma, 2009).

Por lo tanto en la investigación y planificación agrícola, el desarrollo de modelos para simular diferentes procesos, para cambiar un sistema, experimentar diferentes alternativas, generar escenarios relacionados con su eficiencia, es una práctica frecuente, que sustentada con información científica es útil para pronosticar resultados en situaciones y condiciones particulares, lo que permite orientar la investigación o el manejo hacia los puntos más críticos antes de implementar los cambios en la realidad (Gormley y Sinclair, 2003; Rotz *et al.*, 2005; Cichota *et al.*, 2010).

Los agroecosistemas se caracterizan por interacciones complejas de procesos y la modelización puede considerarse un método eficiente para reducir y entender esta complejidad;

por tanto debe incluir el clima, la disponibilidad de agua y nutrientes, el manejo, la variedad del cultivo, entre otros y sus interacciones para lograr los objetivos propuestos y simular la producción de materia seca en función de las condiciones del área considerada (Milera y Crotti, 2005; Candelaria *et al.*, 2011). La complejidad del modelo depende de la cantidad de esos procesos que se consideren; por lo tanto entre más procesos, las etapas de calibración, simulación y validación tendrán un mayor grado de dificultad, consumirán más tiempo y muchos datos serán requeridos para la calibración. Los modelos de agroecosistemas por lo tanto deben ser suficientemente complejos y exhaustivos en su desarrollo y a la vez simples y comprensibles en sus estructuras cuantitativa, dinámica y mecanicista; el modelo puede ser simple y describir solamente un proceso o complejo al incluir varios procesos y sus interacciones, como por ejemplo: la fotosíntesis, la fenología, la distribución de biomasa, la disponibilidad de agua y nitrógeno (Link, 2005).

El número y tipos de modelos para la simulación de cultivos existentes en la bibliografía es grande, principalmente porque no existe un modelo general que pueda adaptar todas las diferentes situaciones de los sistemas, objetivos del investigador o las condiciones ambientales. Existen modelos de simulación para cultivos específicos como el CERES-Wheat, CORNGRO, SIMTAG, SIMBA para banano, también existen modelos genéricos que pueden ser aplicados a diferentes cultivos con la utilización de parámetros específicos como el DSSAT, DAISY, SOILN, EPIC, WOFOST, STICS, APSIM, OVERSEER y CROPSYST (Brisson *et al.*, 1998; Cichota *et al.*, 2010; Sharp *et al.*, 2011).

#### 1.2.4.2. Modelado de la producción de los cultivos

La modelización de la producción de un cultivo se hace generalmente partiendo de una condición ideal; el rendimiento máximo o potencial, viene determinado principalmente por las características genéticas y por la buena adaptación del cultivo al ambiente predominante. El rendimiento máximo de un cultivo se define como el rendimiento cosechado de una variedad de gran producción, adaptada al ambiente y que durante su ciclo no presente condiciones limitantes por agua, nutrientes, plagas o enfermedades y la producción dependerá solamente de las condiciones de radiación, temperatura y suelo que pueden ser o no ser consideradas (Doorembos y Kasam, 1979; De Wit, 1986).

En tal sentido, el crecimiento de las plantas está caracterizado por los procesos de captura de la radiación solar, dióxido de carbono, agua, nutrientes y manejo agronómico. Los modelos traducen las relaciones del crecimiento con estos distintos factores en una colección de

ecuaciones matemáticas; por lo que muchos modelos de crecimiento poseen un módulo que calcula la producción de biomasa según el uso de la radiación, el dióxido de carbono capturado y el agua transpirada; por lo tanto el crecimiento del cultivo está dirigido por la acumulación neta de carbono asimilado por las hojas y transformado en biomasa, la cual es distribuida diferencialmente entre los órganos que conforman la planta, considerando las pérdidas por respiración que pueden estar acopladas con la disponibilidad de agua y nutrientes entre otros factores (De Wit, 1986; Sau *et al.*, 2010).

Todos los modelos de cultivo tienen en sus ecuaciones de crecimiento a la radiación solar como fuente conductora para la asimilación de carbono y también del proceso transpiratorio ya que ambos ocurren por los estomas; sin embargo, la modelización del cultivo según la importancia de los procesos y la escala seleccionada puede realizarse por tres vías, la vía de la radiación, la vía del carbono y la vía del agua. La vía de la radiación simula todos los procesos de intercepción y uso de la radiación, mediante un coeficiente de eficiencia en el uso de la radiación que relaciona la producción de biomasa por unidad de energía radiante interceptada. La vía del carbono, simula los procesos de intercepción y uso de la radiación mediante estratos definidos del dosel y calcula las pérdidas por respiración y la vía del agua (transpiración) hace el cálculo en función de un coeficiente llamado eficiencia en el uso del agua para calcular la biomasa acumulada, que relaciona la tasa de transpiración y la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> (De Wit, 1986; Mariscal *et al.*, 2000; Stockle y Kemanian, 2004).

Otro aspecto de interés es simular la respuesta del crecimiento y la producción a diferentes factores limitantes del crecimiento como: producción potencial cuando no hay limitantes; producción limitada por agua; producción limitada por nitrógeno y producción limitada por otros factores de estrés (plagas, enfermedades, arvenses y deficiencia de nutrientes) para de esta forma completar el modelo del cultivo y ajustarlo a situaciones reales (Van Ittersum *et al.*, 2003).

Un ejemplo de un modelo que integra el crecimiento con los estreses es el STICS, que caracteriza el cultivo por su biomasa aérea (carbono y nitrógeno), el índice foliar, el número y biomasa de los órganos cosechados; simula el crecimiento por el balance de carbono y como el balance de nitrógeno depende parcialmente del carbono los simula al mismo tiempo, un índice térmico controla el desarrollo fenológico y el estrés hídrico o de nutrientes los incorpora por tres índices que pueden reducir el crecimiento de las hojas y la eficacia de uso de la radiación, los cuales son generados en balances de agua y nitrógeno (Brisson *et al.*, 1998).

#### I.2.4.3. Balance hídrico

Los modelos de balance hídrico se sustentan en las leyes físico biológicas que gobiernan los intercambios de agua entre el suelo, la planta y la atmósfera y requieren de parámetros de entrada como las características del suelo, desarrollo de raíces, precipitación, temperatura, viento, entre otras. Su importancia radica en que permiten simular procesos de aprovechamiento o almacenamiento del agua a diferentes escalas, determinar cómo son afectados sus flujos por efecto de suelo, pendiente o vegetación, y acoplados a modelos de nitrógeno u otros elementos estimar sus entradas y salidas de los sistemas estudiados. Su alcance depende, como se ha indicado anteriormente, de los objetivos planteados por la investigación o aplicación, por lo que se tienen modelos generales como los que se presentan en los modelos de cultivos o específicos para un determinado flujo que incluyen en mayor o menor grado de precisión, todas las variables del balance hídrico (Rutter *et al.*, 1975; Maraun y Rapidel, 1990; García-Linares *et al.*, 2003; Teklab *et al.*, 2011).

El balance hídrico en STICS usa la precipitación y evapotranspiración potencial para calcular el balance, la evapotranspiración es calculada con la ecuación de Penman-Monteith y está limitada por el estado de humedad del suelo y el estado energético de la atmósfera, que genera un índice de estrés que actúa sobre el crecimiento potencial (Brisson *et al.*, 1998).

El modelo CROPSYST, calcula el balance hídrico incluyendo la precipitación, riego, escurrimiento, interceptación, infiltración del agua, redistribución del agua en el perfil del suelo, este factor es manejado en un enfoque de cascada o diferencias finitas para calcular los flujos de agua del suelo y la evapotranspiración de referencia puede ser calculada por tres opciones, el modelo de Penman-Monteith, Priestley-Taylor o una implementación más sencilla de este último (Ferrer *et al.*, 2000).

El modelo FOREST, es un modelo sencillo que al igual que los modelos anteriores utiliza las variables climáticas y los flujos ya mencionados por medio de sub-modelos específicos para cada uno, considera el agua útil y el almacenamiento de agua en el suelo para estimar el drenaje y para el escurrimiento un modelo lineal en función de la precipitación y un coeficiente de escurrimiento. Presenta limitaciones debido al paso de tiempo que es de cinco días que limita la simulación de ciertos flujos que cambian a diferente frecuencia y la influencia biológica en el aprovechamiento del agua es limitada a diferencia de otros modelos más complejos como el CERES (Maraun y Rapidel, 1990).

El modelo CERES consta de un conjunto de sub-modelos para una serie de factores como el suministro hídrico, mineral, fotosíntesis entre otros, que simulan el crecimiento y desarrollo de varios cultivos que conducen a la estimación del rendimiento; brevemente se describe el sub-modelo de balance hídrico que incluye el escurrimiento según características del suelo y la intensidad de las lluvias, el drenaje en base a un perfil de suelo de capas superpuestas homogéneas cada una caracterizada por su contenido de agua a saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente; la evaporación del suelo considera la humedad de la capa superficial y la radiación neta que llega al suelo y la transpiración con un balance de energía, el índice de área foliar, el agua disponible por capa y la densidad relativa de raíces en cada capa; este tipo de modelos luego de una etapa de calibración presenta buenos ajustes entre la simulación y la realidad, el inconveniente que presenta es la cantidad de parámetros difíciles de medir y limitados al área de medición (Quemada *et al.* 1999; Sau *et al.* 2010).

#### 1.2.4.4. Balance de nitrógeno

Uno de los objetivos del balance de nitrógeno es el cálculo del nitrógeno disponible para la absorción del cultivo. Sin embargo, este cálculo involucra diferentes procesos que están afectados por el sistema suelo-planta de manera directa o indirecta y el nivel de detalle que se incluya en el modelo depende del nivel de conocimiento que se tenga de ellos o de los objetivos. Para el cálculo de la absorción de nitrógeno existen numerosos modelos de diferentes tipos y generalmente determinan la absorción por el suministro de nitrógeno del suelo y la demanda, la diferencia está en cómo estiman los términos de suministro, demanda y cuales factores que afectan estos procesos son incluidos (Ma *et al.*, 2009).

El balance de nitrógeno del modelo genérico STICS, se simula en función de la mineralización que se asume proviene de tres fuentes la degradación de la materia orgánica: materia orgánica humificada, residuos de cosecha y biomasa microbiana, además incluye para el cálculo, dos capas de suelo, la humedad y la temperatura. Se calcula un índice de estrés de nitrógeno que está directamente vinculado a la satisfacción de las necesidades del cultivo siguiendo el índice de nutrición de nitrógeno (Brisson *et al.*, 1998).

CROPSYST, para el balance de nitrógeno incluye transformaciones de nitrógeno (mineralización neta, nitrificación y desnitrificación), absorción de amonio, fijación simbiótica, demanda del cultivo. Se simula el transporte de nitrógeno en el suelo con la interacción entre el balance hídrico y de nitrógeno. Todos los resultados del modelo se comprueban en cada paso de

tiempo y los errores en los parámetros de entrada o en los resultados, se indican con ventanas emergentes cuando los parámetros o resultados están fuera del umbral establecido previamente. Además incluye una concentración de nitrógeno crítico bajo del cual el crecimiento de la planta es limitado y un mínimo de concentración de nitrógeno en la planta, para simular el efecto de la limitación (Ferrer *et al.*, 2000; Stockle *et al.*, 2003).

OVERSEER y APSIM son modelos que incluyen un sub-modelo de balance de nitrógeno que es usado para la determinación de las pérdidas de nitrógeno por lavado en Nueva Zelanda, debido a la reglamentación sobre la contaminación que genera la agricultura, la estimación del lavado de nitrógeno se efectúa con parámetros de entrada de clima, suelo y manejo, parámetros internos de evaporación, volatilización, desnitrificación entre otros, genera el balance hídrico y de nitrógeno y simula la salida del nitrógeno por lavado. Para las condiciones de Nueva Zelanda OVERSEER ha dado buenos resultados y por el contrario APSIM tiene problemas con el balance de nitrógeno a largo plazo por una sobreestimación de la mineralización de nitrógeno (Cichota *et al.*, 2010; Sharp *et al.*, 2011).

#### 1.2.4.5. Modelos de simulación en musáceas

La particularidad del crecimiento de las plantas de musáceas y la heterogeneidad o desfase del crecimiento entre las plantas luego del primer ciclo de producción, limita el uso de modelos genéricos tales como STICS, CROPSYST o DSSAT para la simulación del cultivo y producción. Por lo que algunos aspectos a considerar para la modelización son como ya se mencionó la heterogeneidad del crecimiento de la plantación entre ciclos, la fenología que se describe principalmente por la emergencia, aparición de vástagos, emergencia de la bellota y cosecha; la heterogeneidad en el crecimiento de las plantas individuales puede ser debida a fenómenos fisiológicos, características espaciales del suelo; aspectos de manejo que influyen en la dinámica de las plantas como el deshije o la resiembra (Nyombi, 2010).

Las experiencias en modelado de musáceas, especialmente en banano, son recientes, Turner (1990), propone un modelo de demanda de nitrógeno para banano en Australia, con el objetivo de permitir la planificación de la aplicación de fertilizante a través de sistemas de riego, el cual se basó en la radiación interceptada y la temperatura para estimar la materia seca y la cantidad de nitrógeno en los tejidos se asumió que correspondía al 1% de la materia seca, el modelo detectó diferencias estacionales con respecto a la demanda de N en validaciones efectuadas en Israel y Australia subtropical, atribuyendo la diferencia al menor valor del índice de

área foliar en Israel en comparación al obtenido en las condiciones subtropicales de las plantaciones de Australia.

Nyombi (2010) indica que Kooman y Jones (1995) modificaron un modelo general relativamente simple desarrollado por Spitters y Schapendonk (1990) para ser usado en la simulación del crecimiento para un solo ciclo del cultivo de banano con distribución de la materia seca para un hijo. Woomeer *et al.* (1998) adaptó el modelo CENTURY desarrollado por Parton *et al.* (1987) para simular el crecimiento de la planta y la dinámica de la materia orgánica bajo la temperatura de varias regiones en África sin buenos resultados.

El modelo SIMBA-POP fue creado por Tixier *et al.* (2004) para simular el crecimiento particular de las plantaciones de banano, el mismo cuenta con una serie de sub-modelos; en los mismos las variables climáticas, como la lluvia, temperatura y radiación solar, junto con las propiedades del suelo se incluyen como información de entrada (variables exógenas) y se utilizan en el cálculo de variables de control y umbrales asociados a la acumulación de temperatura. Este modelo también incluye el manejo del cultivo a través de prácticas como la selección de hijos. Luego Tixier *et al.* (2007) incorporaron con buenos resultados un modelo para determinar el ingreso económico de las plantaciones y la mejor fecha de siembra para obtener mayores ingresos en base a la variabilidad de la cosecha y los precios en el tiempo. Dorel *et al.* (2008), desarrollan el modelo SIMBA-N para el manejo de la fertilización nitrogenada en sucesivos ciclos del cultivo, por medio del cálculo de un balance de nitrógeno que incluye la absorción de nitrógeno por el banano, la escorrentía de nitrógeno y el nitrógeno suministrado por la mineralización de la materia orgánica; este modelo genera buenos indicadores para manejar la fertilización. Damour *et al.* (2012) desarrollan el modelo SIMBA GROW que simula las limitaciones de agua y nitrógeno en el cultivo de banano y la posibilidad de cultivos asociados, basado en el modelo SIMBA-N, logrando simular satisfactoriamente el crecimiento del banano en sistemas de cultivo asociado.

Sansoulet *et al.* (2008) simularon los flujos hídricos usando el modelo HYDRUS, que describe en tres dimensiones la variabilidad de los flujos saturados del agua sobre la superficie del suelo. Sus resultados muestran que, debido al impacto del flujo caulinar, los volúmenes de drenaje bajo la planta fueron seis veces mayores que en las hileras. Charlier *et al.* (2009), incluyen un compartimiento del flujo caulinar de las plantas de banano para estimar la escorrentía a escala de parcela con el uso del modelo MHYDAS, los resultados indican que el flujo caulinar incide en la formación de flujos de escorrentía y que la distribución de la lluvia debe ser considerada en los modelos de distribución de la escorrentía a escalas mayores.

El modelo LINTUL BANANA 1, (Nyombi, 2010), es un modelo de simulación del crecimiento para la producción potencial de banano en África. El modelo simula la unidad de producción compuesta por tres generaciones (planta madre, hijo y nieto) con una duración de más de un año, el dosel fue dividido en tres niveles donde el hijo y el nieto reciben menos radiación por el sombreado de la planta madre. La producción de biomasa es modelada como el producto de la interceptación de la luz y una constante de eficiencia en el uso de la luz y coeficientes de distribución de la biomasa que son definidos en función del desarrollo fenológico. El modelo cuenta con cinco sub-modelos: 1- desarrollo fenológico; 2- interceptación y uso de la luz; 3- desarrollo y senescencia de las hojas; 4- producción de materia seca y transferencia entre las generaciones y 5- partición de materia seca entre el vástago y las raíces. El ciclo fenológico es simulado en función de los grados día. El modelo estima adecuadamente el potencial de producción bajo las condiciones de estudio.

Chaves *et al.* (2009), desarrollaron un modelo de rendimiento potencial para el cultivo de plátano Dominico-Hartón, considerando los parámetros de coeficiente de extinción de la luz, la eficiencia del uso de la luz y el índice de área foliar para la simulación del crecimiento del cultivo y distribución de asimilados los cuales fueron establecidos por ecuaciones obtenidas en la bibliografía. Del análisis de sensibilidad resulta que el parámetro al cual la producción fue más sensible es la eficiencia del uso de la luz y por lo tanto se debe orientar las investigaciones con respecto a mejoramiento genético y manejo del cultivo para mejorar la captura de CO<sub>2</sub> y conversión de la luz incidente en materia seca.

### **1.3. El cultivo de plátano como sistema de estudio**

#### **1.3.1. Descripción de la planta y sus órganos**

En esta parte se describirán algunas de las características particulares del cultivo de plátano y los retos metodológicos y conceptuales que plantea su estudio, debido a su tamaño, forma de crecimiento (clonal) y tipo de reproducción (vegetativa).

Las musáceas (banano, plátano y topocho) son hierbas gigantes, que pueden alcanzar de 2 a 7 m de alto, perennes, con tallo subterráneo y alta acumulación de materia seca (Lecompte *et al.*, 2002). Son nativas del sudoeste asiático, desde India y Tailandia hasta Nueva Guinea y Australia. Se cree que inicialmente fueron llevadas por los árabes a España y de ahí traídas a América directamente o vía Islas Canarias (Simmonds, 1973, Belalcázar, 1991, Price, 1996).

El plátano, pertenece a la familia de las Musáceas al subgrupo plátano, *Musa* AAB, en Venezuela se le llama Hartón o Hartón Gigante. En la figura I-6, se presenta la planta con sus órganos principales indicando la parte subterránea conformada por el cormo (tallo verdadero) y el

sistema radicular, la parte aérea conformada por el seudotallo, hojas, el racimo y los hijos, que se explican brevemente a continuación.

Sistema Radical: la morfología radicular del plátano corresponde a un sistema fasciculado y fibroso (Simmonds, 1973, Belalcázar, 1991, Price, 1996), conformado por raíces primarias, secundarias, terciarias y los pelos absorbentes. Su grosor y longitud presentan estrecha relación con la estructura y textura del suelo; generalmente, en suelos livianos son delgadas y pueden alcanzar alrededor de los tres metros de longitud, mientras que en suelos pesados son más gruesas y alcanzan longitudes de aproximadamente dos metros (Belalcázar, 1991). Su distribución espacial puede considerarse como del tipo radial horizontal, encontrándose el mayor número de raíces en la capa de suelo correspondiente a los primeros 20 cm de profundidad, que puede estar relacionada con la mayor cantidad de materia orgánica que generalmente está presente en esta capa y se relaciona linealmente con el rendimiento. Su crecimiento está orientado hacia las áreas más fértiles del suelo (Belalcázar *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2007). La biomasa radicular puede oscilar entre 0,27 a 4,9 kgMS.planta<sup>-1</sup> en la fase de floración (Simmonds, 1973; Draye, 2002; Belalcázar *et al.*, 2005; Vaquero, 2005; Turner *et al.*, 2007; Blomme *et al.*, 2008).

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

Tallo subterráneo o cormo: el tallo de la planta de plátano corresponde a un cormo subterráneo erecto con ramificación simpódica (Simmonds, 1973). En el ápice se encuentra ubicado el meristemo apical, rodeado por las bases de las vainas de las hojas diferenciadas, las cuales forman lo que se denomina seudotallo (Belalcázar, 1991). Las yemas, están ubicadas en la base de cada entrenudo, pero las que efectúan el crecimiento simpódico (futuros hijos), son principalmente las ubicadas alrededor de la parte media del cormo (Simmonds, 1973; Belalcázar, 1991); por esta razón la unidad de producción o cepa, está caracterizada por una planta madre (cormo principal) y un número variable de vástagos laterales o hijos alrededor del cormo y los hijos de estos denominados nietos. Del cormo parten todos los órganos, tanto aéreos como subterráneos, y es el centro de recepción y redistribución de agua, nutrientes y asimilados para todos los órganos; al ser utilizado como “semilla” (reproducción vegetativa) constituye la fuente inicial de asimilados para el crecimiento de la plantas (Simmonds, 1973; Belalcázar, 1991).

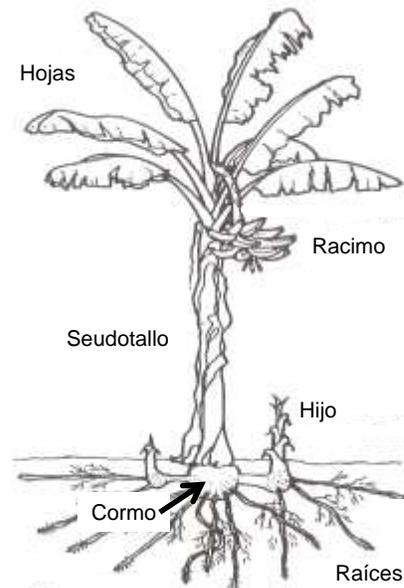


Figura I-4. Dibujo de una planta de plátano mostrando sus principales órganos.

Sistema foliar: las hojas presentan filotaxia helicoidal a lo largo delseudotallo de la planta, conformadas por tres partes: limbo, seudopéciolo y la vaina. El limbo o lamina foliar, es de forma ovalada, el cual cambia su simetría en función de la edad de la planta. Con respecto al tamaño del limbo, varía con respecto al largo y ancho de un mínimo de 21,3 x 1,6 cm para hojas rudimentarias a un máximo de 258,8 x 87,8 cm para la hoja número 32. Las hojas se componen de dos semilimbos, la nervadura central, nervaduras laterales. Durante el ciclo vegetativo se emiten  $38 \pm 5$  hojas, permaneciendo activas durante la fase de crecimiento un promedio de 7 a 14 hojas bien desarrolladas, lo que implica una frecuencia de emisión de 1 hoja nueva cada 7 a 12 días (dependiendo del clima) que luego de la floración disminuyen progresivamente por efecto de la senescencia y el ataque de enfermedades foliares, llegando a la cosecha con 4 hojas aproximadamente (Simmonds, 1973; Belalcázar, 1991). El sistema foliar a lo largo del ciclo vegetativo presenta un tamaño que varía entre 2 a  $679 \text{ gMS.m}^{-2}$  y representa el segundo lugar en tamaño después delseudotallo (Samuels *et al.*, 1978). Turner *et al.* (2007) reportan una variación significativa del índice de área foliar en función de la altitud y/o de la densidad de siembra entre 2 a  $5 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ .

Las hojas se han utilizado en los estudios de crecimiento de enfoque agronómico como marcador de los cambios de las etapas fenológicas de la planta, a lo largo del período de desarrollo y para la implementación de las prácticas de manejo. Es importante mencionar que debido a los problemas fitosanitarios en el cultivo, especialmente a nivel foliar por la enfermedad Sigatoka Negra, que afecta el patrón de crecimiento del cultivo, acelerando el proceso de senescencia foliar

parcial y/o total, se reduce significativamente el aparato fotosintético de la planta y se incrementa la cantidad de necromasa aérea a lo largo del ciclo del cultivo, afectando la duración y llenado del fruto (Nava y Villareal, 2000; Guzmán, 2006).

Seudotallo: es un órgano formado por la imbricación de las vainas de las hojas, que cumple funciones de almacenamiento, sostén de las láminas foliares y las estructuras reproductivas. Al momento de la floración es el órgano con mayor materia seca, más de 515,8 gMS.m<sup>-2</sup> para las variedades de Dominico y Hartón (Samuels *et al.*, 1978; Belalcázar *et al.*, 1999).

Las dimensiones que puede alcanzar con respecto a la altura y perímetro están relacionadas con la densidad poblacional, el estado nutricional entre otros factores edafoclimáticos (Belalcázar, 1991).

La inflorescencia: su desarrollo comienza en el momento de la diferenciación del meristemo apical de foliar a floral, que ocurre aproximadamente en el momento que la planta ha emitido la mitad del total de hojas. La inflorescencia o bellota, tiene forma ovoide y coloración violácea, conformada de afuera hacia adentro por las brácteas que cubren en forma alterna de seis a siete nódulos (manos) de flores femeninas, pistiladas y un número variable de nódulos de flores masculinas y estaminadas.

El racimo: presenta forma coniforme, con un peso promedio de 14 kg, con frutos grandes de color verde y amarillos al madurar en un número de 45 en promedio, la primera y segunda mano son las que cuentan con mayor número de dedos entre 10 a 15 por mano (Simmonds, 1973; Belalcázar, 1991).

La unidad de producción (U.P.)

La U.P. también denominada cepa o macolla, es una estructura generacional conformada por grupos de plantas caracterizadas por un número variable de vástagos (brotes laterales o hijos) alrededor del cormo principal de la planta madre. El cormo principal ejerce dominancia apical sobre los brotes retardando su crecimiento. En plantaciones comerciales, se cortan y atrofia el crecimiento de los hijos y nietos, dejando generalmente uno o dos con la finalidad de reemplazar en su momento a la planta cosechada; cuando éstos brotes o nuevos vástagos no son eliminados, pueden reducir el rendimiento del cultivo (Draye, 2002).

Específicamente la planta madre es el cormo sembrado en el primer ciclo de producción o fundación y en los siguientes ciclos es la planta de mayor desarrollo, los hijos son vástagos secundarios que nacen del cormo principal y los nietos son vástagos terciarios que nacen del cormo de los hijos. Al momento de cosechar la planta madre, se corren los nombres, el hijo seleccionado y de mayor desarrollo pasa a ser madre y el nieto pasa a ser hijo y es el momento de comenzar a seleccionar un nuevo nieto.

Esta particularidad en la reproducción vegetativa implica que en el patrón de distribución de los asimilados de la planta madre, estos no solo se dirijan a sus propios órganos sino a la producción de vástagos laterales secundarios y terciarios. Nava (1977) en plátano Hartón y Cavalcante *et al.* (2005), en banano demostraron con marcadores isotópicos ( $^{32}\text{P}$ ), que este nutriente se desplaza desde la planta madre al hijo, como desde el hijo a la planta madre durante todo el ciclo de cultivo, demostrando la importancia y magnitud de translocación y retranslocación entre el vástago principal y los secundarios, aunque el flujo hijo-madre nunca llega a ser mayor que el flujo madre-hijo; así mismo, se ha reportado que después de la cosecha de la planta madre, los hijos pueden recibir nutrientes retranslocados de las estructuras que quedan operativas: seudotallo, cormo y raíces (Walmsley y Twyfort, 1968; Govea, 1991; Vargas *et al.*, 2005; Galvis *et al.*, 2013).

El patrón de reproducción vegetativa, superposición de generaciones y mecanismos de retranslocación de asimilados y nutrientes, plantea un particular y singular modelo de patrones fisiológicos del crecimiento a tener en cuenta para el manejo del cultivo y su modelización.

#### Ciclo productivo

El ciclo productivo del plátano Dominico Hartón, en Colombia, presentado por Belalcázar (1991), indica que presenta tres fases: vegetativa, reproductiva y productiva, como se comentó anteriormente (figura I-5).

Con respecto a las etapas de desarrollo, Cayón (2004), indica que durante la etapa inicial de desarrollo la planta debe construir el sistema de raíces y las hojas para los procesos de absorción y asimilación fotosintética, luego almacena carbohidratos y otras sustancias en los cormos y seudotallo, para la emisión de rebrotes, la floración y el llenado del racimo en la fase final.

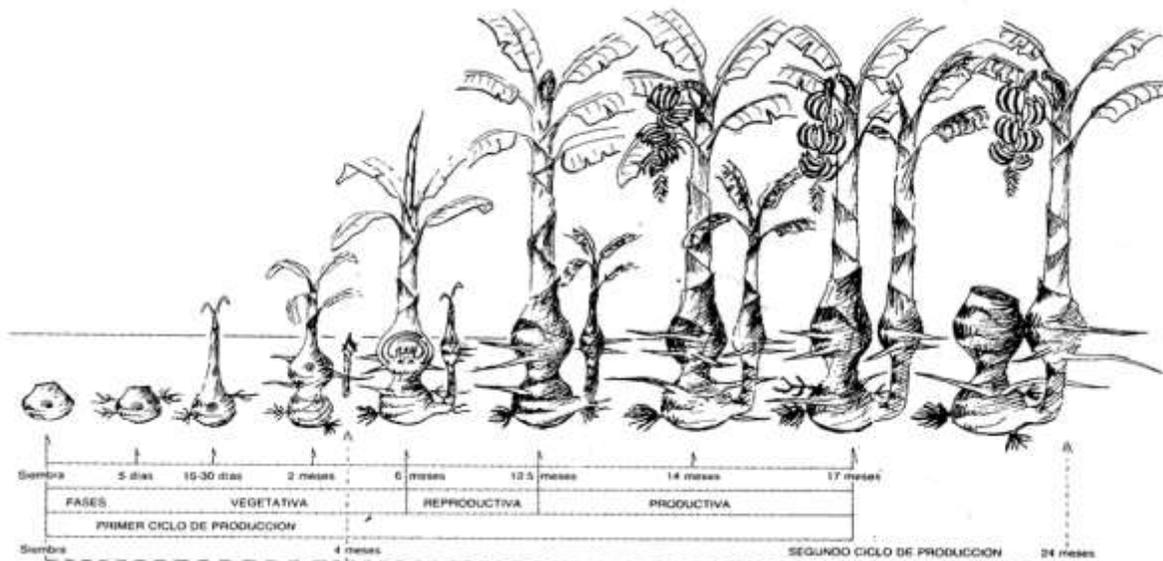


Figura I-5. Etapas del ciclo de vida del plátano Dominic Hartón, en Colombia, bajo condiciones de clima medio a 1310 msnm (Belalcázar, 1991).

### I.3.2. Características del crecimiento de la planta y su análisis

Las plantas cultivadas son uno de los componentes principales del agroecosistema, implicadas en muchos de los procesos del balance hídrico (intercepción, transpiración, flujo caulinar) y de N (absorción, pluviolavado, producción de hojarasca), en consecuencia es importante para un análisis agroecosistémico caracterizar la dinámica de crecimiento, de acumulación de biomasa, los cambios en la distribución de los asimilados y en la dinámica de absorción de nutrientes a lo largo del tiempo. Es por esta razón que hemos dedicado una parte importante del esfuerzo de esta tesis en dicha caracterización, la cual luego va a constituir una base importante para el proceso de modelización. A continuación detallamos algunos de los antecedentes importantes relacionados con estos aspectos; particularmente para plátano, son muy limitadas las investigaciones, aspectos que plantean desafíos particulares para realizar el análisis de crecimiento.

#### I.3.2.1. Dinámica del crecimiento

El crecimiento es un proceso fisiológico complejo, que se define como un incremento de biomasa global de la planta y sus órganos con variaciones de tamaño, que es acompañado de cambios en forma y/o número, que está influenciado por el genotipo, las condiciones edafoclimáticas del área, entre otros factores (Hunt, 1978; Rodríguez y Leiner, 2006).

El análisis del crecimiento se puede interpretar como la aproximación cuantitativa a partir de datos simples y básicos de biomasa por el método de cosecha, para la explicación de los patrones y la dinámica de cómo crecen las plantas o sus órganos bajo diferentes tipos de condiciones agroambientales experimentales o comerciales (Hunt, 1978; Hunt *et al.*, 2002). Tal como lo propone Hunt (1990), éste análisis incluye el cálculo de una serie de variables fisiológicas y morfológicas como las tasas absolutas y relativas de crecimiento de la planta como un todo y de sus órganos en forma independiente, la tasa de asimilación neta, el área foliar específica, la tasa de absorción de nitrógeno u otros nutrientes, la tasa de translocación de asimilados entre los órganos y el índice de área foliar. Dichos parámetros pueden ser obtenidos a partir de la biomasa y la concentración de nutrientes de toda la planta y por órganos a lo largo del tiempo, que se ajustan a funciones matemáticas; permitiendo mejorar la comprensión del comportamiento fisiológico de las plantas.

Este análisis de crecimiento ofrece un enfoque para interpretar el desarrollo de una planta o cultivo e identificar las respuestas morfológicas y fisiológicas ligadas a diferentes tipos de déficit o estrategias de manejo, por ejemplo: los cambios en la fertilización o la densidad de siembra, entre otras. Obteniendo al mismo tiempo, una descripción matemática del crecimiento que nos da la estructura y dinámica de los procesos fisiológicos de asignación y distribución de asimilados que se traducen en biomasa vegetal, que es el punto central de información requerida para la formulación de la estructura de modelos de simulación de cultivos.

La dinámica de crecimiento en las musáceas se ha estudiado principalmente en el banano (*Musa* AAA) desde los primeros trabajos sobre la producción de materia seca, distribución entre órganos de la planta y área foliar en clima tropical realizados por Martín-Prevel *et al.* (1965), citado por Turner (1972) y en clima subtropical en Australia por Turner (1972). Luego los estudios han incorporado evaluaciones de las etapas fenológicas, los estados fisiológicos de la planta en diferentes condiciones en países productores de Centro América y el Caribe. Para el caso del plátano son pocos los trabajos que hemos podido localizar, uno de los primeros trabajos es el presentado por Samuels *et al.* (1978), sobre el contenido de nutrientes del plátano Maricongo (*Musa* AAB) durante el crecimiento, donde presenta información de materia seca y acumulación de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en un ciclo del cultivo; luego Swennen y Langhe (1985), presentan relaciones entre diferentes parámetros de crecimiento y desarrollo delseudotallo, hojas y el racimo. Rojas *et al.* (1987), efectúan una caracterización del ciclo vegetativo del plátano Hartón en Colombia, Sancho (1996), presenta el análisis del crecimiento y distribución

de biomasa en plátano, según la fenología de la planta en Costa Rica y más tarde Belalcázar *et al.* (1999) presentan una dinámica de elementos nutritivos del plátano Dominico-Hartón (*Musa* AAB) en Colombia donde analizan la acumulación de materia seca por órgano. Entre 2000 a 2013, los estudios se orientaron en determinar el efecto de las condiciones edafoclimáticas sobre la dinámica de crecimiento de ciclos sucesivos (Blomme *et al.*, 2005a; Blomme *et al.*, 2008), efecto de los brotes (hijos) sobre el rendimiento (Oluwafemi, 2013), descripción de etapas fenológicas (Aristizábal y Jaramillo, 2010) y análisis de crecimiento de la planta o alguna de sus partes y acumulación de nutrientes (Aristizábal, 2008; Chaves *et al.*, 2009; Bezerra *et al.*, 2010; Castillo *et al.*, 2011).

Martín-Prevel (1979) realiza una extensa revisión de la literatura sobre el desarrollo del crecimiento de las musáceas abarcando publicaciones desde 1807 hasta 1976. El enfoque de las primeras investigaciones estaba principalmente basado en el conocimiento nutricional de plantas de banano aisladas y cultivadas en macetas, donde se concluía la existencia de elevadas necesidades de nitrógeno ( $221 \text{ gN.planta}^{-1}$ ), más que la determinación de patrones de crecimiento; éstos estudios presentan problemas de representatividad por las condiciones de aislamiento y número de plantas estudiadas; estudios que no representan las condiciones de desarrollo en plantaciones comerciales. Posteriormente, en trabajos entre la década de los 1950 y 1970, en plantaciones de banano comercial de bajo rendimiento, con densidades de 1600 y 2500 plantas. $\text{ha}^{-1}$ , determinaron el stock en biomasa de  $250 \text{ kgN.ha}^{-1}$  y en plantaciones de alto rendimiento los valores de nitrógeno pueden alcanzar de 450 a  $550 \text{ kgN.ha}^{-1}$ .

En general, se describen tres etapas o fases en el ciclo de vida de la planta, una primera etapa vegetativa, la segunda de floración y la tercera de fructificación, donde los procesos de absorción, reposición, translocación de asimilados y nutrientes son muy dinámicos, ya que el aumento y disminución de biomasa y nutrientes cambia rápidamente de una fase a otra.

Simmonds (1973), presenta el trabajo de Summerville (1944) para el banano Cavendish, que menciona tres fases o etapas: la vegetativa (I), la floral (II) y la de fructificación (III), que se diferencian en base a cambios morfológicos y fisiológicos; se menciona una división de la fase vegetativa en dos, producto de hechos fisiológicos, resalta que esta fase vegetativa es fundamental para el desarrollo subsiguiente de la planta y el tamaño del fruto; la etapa II, se caracteriza por la contracción del tallo, elongación de entrenudos y la transición de las hojas a las brácteas portadoras de flores, que ocurre internamente sin señal externa visible. En la etapa III, el

espesor del tallo disminuye, se acortan los entrenudos, coincide con la disminución del área foliar y el desarrollo del fruto.

Con respecto del cultivo de plátano, Stover (1979) y Swennen (1984), citados por Aristizábal y Jaramillo (2010), coinciden en que el ciclo de la planta presenta dos fases: vegetativa desde el momento de la siembra hasta la diferenciación floral y la reproductiva desde la aparición de la bellota hasta la madurez fisiológica. Rojas *et al.* (1987), esquematizaron la duración del ciclo vegetativo de la planta en relación al número de hojas, altura de la planta madre y la planta hijo, la floración y cosecha. Belalcázar (1991), en el clon dominico Hartón en Colombia, identifica tres fases: vegetativa, reproductiva y productiva. La fase vegetativa incluye desde la siembra hasta la diferenciación floral, con una duración de seis a siete meses y es dividida en tres etapas: brotación que va desde la siembra a la aparición de la primera hoja que dura entre 15 a 30 días; organogénesis que comprende la formación del corno superior, crecimiento delseudotallo, hojas y producción de raíces e hijos y la etapa de diferenciación floral, que ocurre alrededor de los cinco a seis meses de iniciada la emisión de hojas o cuando se ha emitido el 50% del total de hojas ( $38 \pm 5$ ) y básicamente consiste en la diferenciación del meristema foliar a floral. La fase reproductiva, está caracterizada por la diferenciación y formación de flores femeninas y masculinas, que en conjunto forman el racimo. La fase productiva, se inicia al finalizar el proceso de diferenciación floral, continúa con el ascenso de esta yema hacia el ápice delseudotallo y posterior llenado de los frutos que conforman el racimo y finalizar en la cosecha, pudiendo durar alrededor de diez meses.

Por su parte Sancho (1996), en base a la curva de crecimiento absoluto, establece tres etapas, la etapa I (establecimiento), durante las primeras 15 semanas después de la siembra, presenta un crecimiento lento por transcurrir el proceso de establecimiento (brotación) y transformación (organogénesis), la etapa II (máximo crecimiento) desde la hoja 16 a la emergencia de la inflorescencia, cuando se acelera el crecimiento debido al aumento del área foliar fotosintéticamente activa y preparación para la fase reproductiva, esta etapa, puede dividirse en dos, prefloración desde la hoja 16 a la diferenciación floral y floración desde la diferenciación floral a parición (emergencia de la bellota) y la etapa III no se describe.

González *et al.* (2002), proponen una codificación del ciclo fenológico de las musáceas, basado en el código BBCH, que describe los cambios morfológicos visibles como la formación de las hojas y eventos asociados con el desarrollo cronológico (días, meses), asignando valores numéricos. Esto puede ayudar al intercambio de información y determinar adecuadamente períodos para aplicación de prácticas de manejo del cultivo en diferentes regiones; el ciclo de la

planta lo dividieron en 10 estados principales desde el 0 para la emergencia y el nueve para la senescencia considerando que la planta no es cosechada y otros dos estados secundarios adicionales para descripción de etapas internas como las fases apertura de la hoja candela (hoja que permanece enrollada desde la emergencia hasta un 25% de su área foliar, momento en el cual pasa ser la hoja 1) o de las brácteas.

Aristizábal y Jaramillo (2010), para el clon Dominico Hartón, indican que posee dos fases: vegetativa y reproductiva (Tabla I-4). La vegetativa, incluye cuatro etapas: V0, donde ocurre la formación de raíces y formación de hojas no funcionales; V1, se caracteriza por el crecimiento activo de la planta, corresponde a la fase inicial de la curva de crecimiento y aumento del tamaño del rizoma, número de raíces y desarrollo de las primeras hojas funcionales, emitiendo en total 14 hojas; V2, se forma el segundo rizoma, continua un desarrollo abundante de raíces y de las hojas; V3, aumento de la actividad metabólica del ápice meristemático y al terminar este proceso faltan por emerger de 9 a 10 hojas; la reproductiva incluye seis etapas: R4, se forma la bellota, se paraliza la formación de hojas, ocurre cuando han emergido 28 hojas y paralelamente en el hijo principal se forma la primera hoja funcional que indica el inicio de la independencia de la planta madre; R5, ocurre el ascenso de la bellota dentro delseudotallo; R6, emerge la bellota en forma vertical y predominantemente de color verde, luego adquiere una posición horizontal, las brácteas se tornan de color púrpura y la bellota toma una posición pendular y abre la primera bráctea; R7, ocurre la apertura de las brácteas quedando expuestas las manos y las flores femeninas y masculinas; R8, empieza la acumulación de carbohidratos en los dedos de las manos, la tasa de acumulación de materia seca disminuye a medida que el racimo se acerca al tamaño máximo potencial y al llegar a éste termina la etapa; R9, esta etapa en plantaciones comerciales ocurre después que el racimo es cosechado.

Como se ha descrito, a pesar de la importancia de una descripción clara de las etapas de crecimiento del cultivo de plátano para el intercambio de información o planificación de manejo del cultivo, los especialistas no llegan a un consenso y realizan aportes de aspectos característicos de cada etapa desde diferentes visiones u objetivos, por lo que el intercambio de información o la descripción realizada en publicaciones no especializadas sobre este tema se realiza generalmente a criterio de los autores. En este trabajo, se emplearon parte de las descripciones consultadas para explicar el comportamiento del cultivo e incorporación de información adicional obtenida.

Tabla I-4. Descripción de las etapas de crecimiento en plátano Dominico Hartón (Aristizábal y Jaramillo, 2010).

Fase	Etapas	Designación	Descripción
Vegetativa	V0	Brotación y emergencia	Desde el momento de la siembra hasta la aparición de la primera hoja funcional. 15 a 21 días
	V1	Plántula	Desde la aparición de la primera hoja funcional hasta la aparición del primer hijuelo. 98 días
	V2	Formación de hijuelos	Desde la aparición del primer hijuelo hasta el inicio del alargamiento de entrenudos
	V3	Alargamiento inicial de entrenudos	Desde el alargamiento de los entrenudos nueve o 10, hasta la iniciación de la bellota
Reproductiva	R4	Iniciación floral	Desde la iniciación de la bellota hasta que el primordio de ésta se observa a simple vista
	R5	Desarrollo de la bellota	Desde que el primordio de bellota se observa a simple vista hasta su emisión en la parte terminal del seudotallo
	R6	Floración	Desde la emisión de la bellota hasta la apertura de la primera bráctea. 14 días.
	R7	Iniciación del racimo	Desde la apertura de la primera bráctea hasta que los primordios de todos los dedos se hacen visibles
	R8	Llenado del racimo	Desde que los primordios de dedos se hacen visibles hasta madurez fisiológica. 120 días
	R9	Maduración	Desde madurez fisiológica hasta maduración completa

### I.3.2.2. Dinámica de acumulación de nitrógeno

Belalcázar *et al.* (1999) y Sancho (1996), indican que existe una clara relación entre la curva de acumulación de materia seca y las cantidades extraídas de nutrientes por la planta de plátano Dominico-Hartón o Curaré semi gigante, en general la acumulación de nutrientes es lenta durante la primera etapa de crecimiento desde la siembra hasta la hoja 10 ó 16 y luego se incrementa desde antes de la diferenciación floral (hoja 22) hasta la etapa de belloteo y después de ésta disminuye la tasa de acumulación de nutrientes; resaltando que a partir de la hoja 20, se presenta un incremento sustancial de la demanda de nutrientes por el aumento en el crecimiento de la planta.

La dinámica de acumulación de nitrógeno por las plantas, en este caso las musáceas, es muy variable entre cultivares, localidades y en las fases fenológicas (Turner, 1990); por otra parte, es un elemento fundamental en el crecimiento de las plantas, en este caso es el segundo más importante después del potasio con respecto a la cantidad acumulada en la planta, pero el primero con respecto a las funciones que cumple dentro de la misma. Por lo tanto la determinación de la acumulación de nitrógeno a lo largo del ciclo del cultivo es de interés para

establecer estrategias de manejo para optimizar su aprovechamiento, dada la gran cantidad de variables que intervienen en su disponibilidad para las plantas. De manera general Greenwood *et al.* (1990), indican que la concentración de nitrógeno orgánico en distintos cultivos alcanza un nivel mínimo o concentración crítica cuando crecen a la tasa máxima. Por encima de esa concentración crítica se trataría de nitrógeno en exceso que no contribuye con una mayor tasa de crecimiento y por debajo estaríamos en situación de déficit. También hay que considerar que a medida que las plantas crecen y se elaboran estructuras de almacenamiento y sostén de bajo contenido de nitrógeno, ocurre un efecto de dilución de la concentración de nitrógeno; según el mencionado autor, esta disminución de la concentración de nitrógeno a medida que aumenta la biomasa es generalizada para todos los cultivos, existiendo una diferencia entre las plantas cultivadas de metabolismo fotosintético C3 y C4. La ecuación que describe esta disminución de la concentración crítica de nitrógeno por el aumento de la biomasa para cultivos C3, y por lo tanto aplicable en principio a las musáceas, es:

$$\%N_{\text{crítico}} = 5.697 * W^{0.5}$$

donde %N es la concentración de nitrógeno crítico en la planta y W es la biomasa del cultivo, en Mg.ha<sup>-1</sup> (Greenwood *et al.*, 1991).

Para el caso de las musáceas, Dorel *et al.* (2008), emplean esta ecuación para simular la absorción de nitrógeno del cultivo de banano en función de la materia seca, asumiendo que cuando el cultivo acumula menos de 2 MgMS.ha<sup>-1</sup> el porcentaje de nitrógeno en la planta es de 4% y si la acumulación de materia seca del cultivo es superior a 2 MgMS.ha<sup>-1</sup> sigue la ecuación propuesta por Greenwood *et al.* (1990). Este ajuste para la primera etapa del crecimiento fue necesario debido a que el banano se reproduce vegetativamente y su concentración de nitrógeno es más baja que la de otras plantas C3 en las primeras etapas de desarrollo. Para el caso del plátano Hartón no existe ningún reporte del uso de esta ecuación.

En general, hay poca información sobre los aspectos fisiológicos de la dinámica de crecimiento y de asignación de asimilados en plátano. No se ubicó ninguna bibliografía con información referente al crecimiento del hijo durante el primer ciclo productivo, es decir no se ha estudiado la dinámica de crecimiento de la unidad de producción (conjunto formado por la madre y su descendencia), desconociéndose los patrones de translocación y retranslocación de asimilados y aún más la dinámica del nitrógeno en el cultivo.

### **I.3.3. Características del sistema de manejo del cultivo del plátano en el Sur del Lago de Maracaibo**

Los sistemas de producción agrícola los define Avilán y Eder (1986), citados por Abreu *et al.* (2007) como un conjunto de prácticas que evolucionan en el espacio y tiempo que están condicionadas por factores históricos, técnicos, culturales, sociales y económicos.

El cultivo del plátano en el Sur del Lago de Maracaibo se siembra tradicionalmente bajo la modalidad de sistema de producción perenne o permanente. Otro sistema que se ha tratado de impulsar sin mucho éxito es el sistema de alta densidad que maneja al cultivo de forma anual o bianual dependiendo del número de plantas por hectárea seleccionado.

Según Abreu *et al.* (2007) se cuenta con tres tipos o niveles tecnológicos para el manejo del cultivo y que además están asociados al tamaño de las parcelas o fincas, en tal sentido se presenta un tipo de manejo de tecnología tradicional característico de los productores pequeños con parcelas de menos de 5 a 20 ha, un tipo de mediana tecnología aplicado por los productores medianos de entre 21 a 70 ha y otro de alta tecnología para los productores grandes de 70 o más ha. En general todos los niveles tecnológicos aplican las mismas prácticas agronómicas, pero se diferencian en la frecuencia de la aplicación, la aplicación o no de una práctica particular, el método de aplicación y la supervisión. Por lo que en esta parte se presentara un bosquejo general de las prácticas agronómicas que se aplican al cultivo del plátano.

Época de siembra: las épocas más apropiadas para la siembra son al inicio del período de lluvia o en cualquier época si se dispone de sistema de riego, que permite además la sincronización de la fecha del primer corte con el período de mayor precio.

Sistemas de siembra: los sistemas de siembra tradicionales son de 3 x 3 m con una semilla (cormo) por punto de siembra, con el tiempo fueron modificados a sistemas más intensivos que dan mayores resultados en los dos primeros ciclos del cultivo en arreglos espaciales que alcancen entre 2000 a 2500 plantas.ha<sup>-1</sup>, disminuyendo luego del primer ciclo paulatinamente el número de plantas.ha<sup>-1</sup> a 1800.

Preparación y trazado del terreno: la preparación del terreno es una labor fundamental para el éxito de la plantación en suelos pesados o con tradición en cultivos anuales o potreros, ésta se puede efectuar con pases de rastra o arado o subsolador según las características del terreno, si no se dispone de maquinaria, lo recomendable es realizar los hoyos de siembra más grandes considerando tamaños de 30x30x30 o 40x40x40 cm.

Semilla y siembra: la semilla a sembrar debe ser seleccionada de plantaciones sanas, bien manejadas y con buen vigor, tomar principalmente hijos llamados “puyones, púa o espada” que son los de mejor calidad; pero también, se pueden seleccionar los hijos bandera u orejones.

Una vez seleccionada la semilla se procede al pelado de la misma, esto es quitar la tierra y las raíces, así como las zonas podridas. Luego se procede a realizar la desinfección de la semilla, el método que se recomienda es aplicar antes o al momento de la siembra el hongo *Trichoderma*. Si la semilla no se siembra inmediatamente es necesario colocarla en un lugar sombreado y taparla.

Debe procurarse que el material vegetal “semilla o cormo”, tenga un tamaño uniforme, alrededor de 1,5 kg. Si por falta de material se tienen cormos de diferente tamaño, es recomendable clasificarlos en grupos lo más uniformes posible y proceder a su siembra de acuerdo a los grupos formados de manera que la plantación se desarrolle lo más homogénea posible.

La siembra se efectúa de tal forma que la parte superior del cormo o chimenea quede 5 a 10 cm por debajo de la superficie del suelo.

Fertilización: la fertilización debe realizarse según el análisis de suelo y número de hoja, siendo conveniente hacerla por lo menos una vez al año. Debido a que cada plantación presenta características de suelo particulares hay que evitar el uso de recomendaciones generales. En plantaciones nuevas se puede efectuar la fertilización en los siguientes momentos: cuando la planta emita la hoja 5, fuente de nitrógeno y fósforo, la hoja 15, formula completa, hoja 20, formula completa. En plantaciones establecidas la fertilización se efectúa en un intervalo de cada 1 a 3 meses de acuerdo a la interpretación del análisis, frente al hijo de sucesión en una banda en distancia de 30 a 40 cm delseudotallo.

Combate de malezas: lo más importante es hacerlo oportunamente (malezas no mayores de 20 cm de altura), alternando controles mecánicos o manuales con los químicos, en ciclos de 6 a 8 semanas.

Deshije: mediante esta práctica se mantiene la población por hectárea en 1800 a 2000 plantas, con el fin de obtener una producción uniforme todo el año. Se debe realizar cada 8 semanas dejando uno o dos hijos como máximo por cepa, dispuestos en forma opuesta cuando sea necesario, uno de los hijos es destinado para la resiembra o para llenar espacios vacíos y el otro para producción. El sistema empleado es el de madre, hijo y nieto, llamado sistema axial.

Deshoje: consiste en la eliminación de las puntas y hojas quemadas principalmente por la Sigatoka Negra y dobladas por el viento, permitiendo la reducción del inóculo de la enfermedad,

además de la aireación del cultivo, facilitar el desarrollo de los hijos, mejorar la distribución de las aplicaciones de productos químicos dirigidos al follaje. Por tanto es recomendable realizarla cada 2 ó 3 semanas dependiendo de la época. Esta labor ha evolucionado a otra llamada “cirugía” debido a que sólo se elimina la parte de la hoja afectada, dejando el resto de la hoja verde, se realiza cada 1 ó 2 semanas.

Resiembra o renovación: consiste en la eliminación de todas aquellas plantas o unidades de producción que han perdido su vitalidad, hijos con poco anclaje o cuando se encuentran claros. En estas circunstancias se siembran hijos puyones de 1,5 m de altura, esta labor se puede realizar cada 8 ó 10 semanas.

Manejo de desechos: los restos de cosecha, deshoje y deshije se deben picar y distribuir uniformemente en toda la plantación, nunca amontonados, para disminuir así el crecimiento de las malezas y a la vez acelerar la descomposición del material de desecho, disminuyendo las poblaciones de plagas y enfermedades.

Cosecha: la primera cosecha se produce más o menos sincronizada unos 10 meses después de la siembra, a partir de allí las plantas van desfasándose y la cosecha puede realizarse en diferentes individuos durante todo el año, de forma que los períodos de corte del racimo se realizan cada 2 ó 3 semanas o menos dependiendo del manejo y destino de la producción. A partir del segundo año inclusive se obtiene un índice promedio de 1,2 a 1,5 racimos/UP/año.

Desburre: es una labor que se efectúa después de cada corte o cosecha y consiste en el corte de las hojas y el seudotallo dejando aproximadamente 1,5 m de alto, para que el hijo aproveche los nutrientes y el agua almacenados en este.

#### **I.4. Planteamiento del problema, preguntas de investigación y objetivos**

##### **Planteamiento del problema**

Dada la poca información existente sobre el cultivo de plátano, en especial sobre los aspectos agroecosistémicos necesarios para diseñar y alimentar modelos de simulación que puedan ser utilizados como herramientas de planificación y manejo, nos hemos propuesto como punto central de investigación el estudio del agroecosistema plátano Hartón, utilizando un enfoque agroecosistémico, que haga énfasis en los procesos relacionados con la dinámica de crecimiento y acumulación de biomasa de la planta, magnitudes de los flujos hídricos y principales aspectos del balance y ciclado de nitrógeno, como un aporte al conocimiento de este importante agroecosistema venezolano y de sus posibles efectos ambientales. Al mismo tiempo utilizaremos el enfoque de modelización, para integrar el conocimiento adquirido con respecto al crecimiento y fitomasa de la planta, los balances hídrico y de nitrógeno, con el propósito de contribuir en el desarrollo de una herramienta que pueda ser de utilidad para la planificación del manejo y evaluación de este cultivo, en aras de aumentar su productividad y minimizar los problemas ambientales, dentro del paradigma de la agricultura agroecológica.

Se evaluó la posibilidad de realizar un experimento de campo con diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada, para contar con información apropiada para la validación de los modelos, sin embargo, dada la complejidad que representa la medición de un conjunto significativo de variables agroecosistémicas en este cultivo caracterizado por plantas de gran porte, se optó por utilizar un sólo tratamiento y colocar el esfuerzo en obtener una visión lo más completa posible de los diferentes aspectos del funcionamiento del agroecosistema.

##### **Preguntas de investigación**

Basándonos en las consideraciones planteadas en el marco conceptual y antecedentes, principalmente en la necesidad de conocer las principales características del funcionamiento del agroecosistema plátano en la zona del sur del Lago de Maracaibo, para lograr una aproximación más integral al manejo de este cultivo, que considere aspectos de la sustentabilidad del sistema, de la eficiencia en el uso de insumos y la disminución de los efectos negativos del manejo, nos hemos planteado como directrices en este trabajo las siguientes preguntas de investigación, referentes a los tres grandes aspectos del funcionamiento agroecosistémico abordados en esta tesis: la producción primaria, el balance hídrico y el ciclado de nitrógeno.

## Producción primaria y distribución de asimilados

El ciclo productivo del plátano, plantea un particular y singular modelo de patrones fisiológicos del crecimiento, acumulación de biomasa y además un tipo de reproducción vegetativa que incorpora la superposición de generaciones, por lo que se forman varios estratos de hojas, lo cual plantea desafíos interesantes a la hora de estudiar la producción primaria de este cultivo tan particular. En este sentido formulamos las siguientes preguntas de investigación:

### **PREGUNTA 1: ¿Cuál es la importancia de los flujos de retranslocación de asimilados y particularmente de nitrógeno para el cultivo de plátano Hartón en el sur del Lago de Maracaibo?**

Los flujos de retranslocación de asimilados y nutrientes entre los órganos de la planta y sus generaciones en el cultivo de plátano han recibido poca atención, a pesar de ser una característica importante del patrón de crecimiento de estas musáceas. En este sentido, Cayón (2004) menciona que el cormo y el seudotallo sirven como depósitos de fotoasimilados que luego la planta retransloca a los frutos. Desde el punto de vista del manejo estos procesos de retranslocación son importantes ya que definen etapas de absorción en las cuales el cultivo debe disponer de nutrientes en el suelo y etapas en que el crecimiento se realiza por movimientos internos de nutrientes, durante las cuales la necesidad de disponer de estos nutrientes en el suelo sería menor y el riesgo de pérdida de los mismos aumentaría. Conocer los patrones de retranslocación entre órganos y generaciones pudiera traducirse en prácticas de manejo más eficientes referidas principalmente a la fertilización y la poda de la planta madre, los hijos y los nietos.

### **PREGUNTA 2: ¿Qué tan eficiente es el cultivo de plátano Hartón, en la interceptación de la luz a lo largo del ciclo productivo y en el momento de máximo LAI en el sur del lago de Maracaibo?**

El aparato foliar de la planta es el encargado de la función de interceptación de la luz, que constituye el punto de partida para la producción primaria. El rendimiento del cultivo depende en gran medida de la proporción de radiación incidente que el cultivo logre interceptar a lo largo de su desarrollo, lo cual es función de su área foliar y arquitectura. La densidad de siembra, la filotaxia de las hojas y la variación de tamaño y posición a lo largo de los estados de desarrollo de la planta influyen en la capacidad de interceptación de la luz (Turner, 1994; Cayón, 2004). Turner *et al.* (2009) y Galán y Robinson (2013), indican que la capacidad de una plantación para interceptar la luz se mide en función del índice de área foliar y refieren que a pesar del tamaño de las hojas de plátano este valor no es muy alto comparado con otros cultivos. En este sentido, conocer la fracción de radiación interceptada nos puede permitir ajustar la densidad de siembra,

aumentándola si la intercepción es muy baja, o pensar en cultivos asociados si resulta que durante el establecimiento hay una etapa en que la intercepción es baja y la radiación no interceptada pudiera ser utilizada por otro cultivo de ciclo corto. Por otro lado también es interesante evaluar el efecto de la práctica de deshoje que se realiza para el control de la Sigatoka y que pudiera estar disminuyendo la intercepción de luz.

**PREGUNTA 3: ¿La cantidad y forma de aplicación de fertilizante nitrogenado que se realiza para el cultivo de plátano en el sur del Lago, permite una sincronización temporal y espacial con la demanda del cultivo a lo largo del ciclo de producción y es acorde con los niveles requeridos por la planta?**

Habitualmente la fertilización en la zona se realiza fraccionando el fertilizante en tres aplicaciones a lo largo del ciclo de cultivo, lo cual en principio debería ser una práctica adecuada, que permitiría un mayor aprovechamiento de los nutrientes aplicados. Sin embargo, cabe preguntarse si los momentos y cantidades aplicadas son los adecuados y coinciden con los períodos de demanda del cultivo o si es posible optimizar esta práctica.

**Balance hídrico**

Con respecto a los flujos hídricos, el clima característico de Selva Húmeda Tropical, con abundantes precipitaciones a lo largo de todo el año, con un máximo de tres meses secos y en algunos años ningún mes seco, aunado a que son frecuentes las lluvias de gran magnitud e intensidad, deben conformar un balance hídrico caracterizado por la gran magnitud de algunos flujos de salida y donde uno esperaría que los cultivos estén más proclives a padecer por exceso que por falta de agua. Toda esta temática cobra relevancia suplementaria debido al aumento de la frecuencia de eventos climáticos extraordinarios acaecidos en los últimos 10 años (inundaciones, ráfagas de viento todo el año (Chubascos y veranos), que están en sintonía con los escenarios de cambio climático planteados por Martelo (2004), para esta zona de Venezuela. En este sentido, hemos resumido las inquietudes con respecto a cómo será el balance hídrico y la respuesta del cultivo en tres preguntas:

**PREGUNTA 4: ¿Qué tan importante puede ser el efecto del dosel en la redistribución del agua de lluvia sobre la superficie del suelo?**

Dadas las características del dosel de este cultivo es de esperar una importante canalización del agua a través del flujo caular hacia la base de la planta así como una redistribución por el goteo del agua retenida en el dosel. Esto pudiera causar una heterogeneidad

en el contenido de agua en el suelo que pudiera ser relevante para el agroecosistema condicionando zonas con más contenido de agua donde se afectaría el funcionamiento de los procesos edáficos.

**PREGUNTA 5: ¿Cuál es la importancia de los diferentes flujos hídricos que conforman el balance de agua del agroecosistema plátano bajo las condiciones edafoclimáticas del área de estudio?**

Las bajas pendientes que predominan en el área y los suelos con altos contenidos de arena nos hacen partir de la hipótesis de que la infiltración debe ser alta y por lo tanto la escorrentía debería ser baja. De validarse esta hipótesis, querría decir que el agroecosistema presenta un alto riesgo de pérdidas de nutrientes por lavado. Por otro lado, el predominio del drenaje sobre el escurrimiento es en principio positivo en la regulación de los flujos hídricos regionales ya que el agua que infiltra sufre un retardo en llegar al sistema de drenaje en relación al agua que escurre.

**PREGUNTA 6: ¿Se podría pensar que en el sur del lago de Maracaibo, caracterizado por niveles de precipitación moderados a altos, las plantaciones de plátano no sufrirían de déficit hídrico?**

Para el caso de los bananos y plátanos comerciales, el agua es el principal factor biológico, que en exceso o deficiencia limita su producción y que determina la expresión de su potencial genético (Martín-Prevel, 1979; Turner, 1996). Dado el clima con muy pocos meses secos y muchos meses con exceso de agua, es de esperar que el cultivo no esté sometido a déficit hídrico y por el contrario una limitación podría ser el exceso de agua, en condiciones en que el nivel freático alcance la zona de distribución de la mayoría de las raíces y se creen posibles condiciones anaeróbicas.

#### Balance de nitrógeno

El cultivo de plátano en la zona es altamente dependiente del uso de cantidades continuas y masivas de fertilizantes, fundamentalmente de nitrógeno, fósforo y potasio para el mantenimiento de los rendimientos (Ciampitti *et al.*, 2005; Bruulsema *et al.*, 2008; Acón-Ho *et al.*, 2013), y que además no son eficientemente utilizadas por los cultivos. En el caso del nitrógeno, su absorción rara vez alcanza el 50% de la cantidad aplicada, presentándose altas pérdidas del sistema suelo-planta (Prasertsak *et al.*, 2001; Muñoz-Carpena *et al.*, 2002; Zotarelli *et al.*, 2007), pudiendo producir cambios en las características de los suelos y riesgo de contaminación ambiental por lixiviación, emisiones gaseosas o elevación de la concentración de sales en los suelos y capas freáticas (Ciampitti *et al.*, 2005; Bruulsema *et al.*, 2008). El Sur del Lago de

Maracaibo, como se ha indicado es la principal zona productora de plátano del país, con un área sembrada estimada en 30.000 ha, con plantaciones permanentes que reciben fertilizantes de 3 a 4 veces al año y donde las investigaciones sobre el uso de fertilizante nitrogenados se han limitado a evaluación de dosis de fertilizante y su efecto en rendimiento, pero se desconoce la dinámica de absorción por la planta y su distribución en los diferentes flujos y compartimientos del ciclo del nitrógeno, en función a estas limitaciones nos preguntamos:

**PREGUNTA 7: ¿Qué tan importantes son las pérdidas de N del agroecosistema plátano y por qué vías se producen?**

Esta es una pregunta clave para mejorar el manejo de la fertilización, evaluar la sustentabilidad del sistema de producción y su efecto contaminante. Si las pérdidas resultasen altas, lo cual suponemos, y dependiendo por cual vía se producen, habría que modificar el manejo agronómico para mejorar la sincronización entre la disponibilidad de nitrógeno en el suelo y los requerimientos del cultivo y entre la ubicación espacial del fertilizante y las zonas de presencia abundante de raíces, modificar el tipo de fuente u otras prácticas agronómicas. Por otra parte, las consecuencias ambientales de las pérdidas de nitrógeno son muy diferentes dependiendo de la vía por que se pierda (volatilización, lavado, desnitrificación).

**PREGUNTA 8: ¿Cuál puede ser la contribución de este agroecosistema a la problemática de la contaminación del Lago de Maracaibo, producto del patrón de fertilización nitrogenada aplicado en las plantaciones de plátano en la zona?**

Finalmente, una de las motivaciones iniciales para la realización de esta tesis fue la contaminación del Lago de Maracaibo que se manifestó de forma espectacular con la proliferación de la lenteja de agua del género Lemna en el año 2004. En ese sentido nos planteamos responder la pregunta anterior en base al análisis cuantitativo del balance de nitrógeno a nivel agroecosistémico, que si bien no permite una extrapolación directa a escala regional, si da una buena idea de la fracción del nitrógeno aplicado que podría estar entrando a las aguas del Lago.

Proponemos al lector que tenga presente estas preguntas en las secciones siguientes y por nuestra parte las retomaremos en la discusión, intentando dar respuesta en base a nuestros resultados a cada una de ellas.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Conocer la dinámica del crecimiento, ciclado de nitrógeno y balance hídrico del agroecosistema plátano e integrar este conocimiento en un modelo de simulación que nos permita comprender la estructura y funcionamiento de dicho agroecosistema bajo las prácticas agronómicas más utilizadas en la región del Sur del Lago de Maracaibo.

### **Objetivos específicos**

1. Caracterizar la dinámica del crecimiento del cultivo de plátano y los cambios en el patrón de distribución de la biomasa y nitrógeno entre los distintos órganos.
2. Medir algunos procesos del balance hídrico tales como la precipitación, precipitación neta, escorrentía y drenaje, con la finalidad de cuantificar las magnitudes del nitrógeno que es movilizado a través de estos flujos.
3. Evaluar el ciclado de nitrógeno en el agroecosistema cuantificando las entradas (precipitación y fertilización), salidas (volatilización, cosecha, lavado, escorrentía y erosión) y las diferentes transferencias (pluviolavado, absorción, entre otras) que ocurren en el agroecosistema y estimar la contribución del agroecosistema plátano en la contaminación ambiental por este elemento.
4. Desarrollar un modelo de simulación que integre la dinámica de crecimiento del cultivo, el balance hídrico y el ciclaje de nitrógeno y calibrarlo con la información generada que nos conduzca a la comprensión integral del agroecosistema plátano en el sur del lago de Maracaibo.

## CAPÍTULO II. MARCO GENERAL METODOLÓGICO

### II.1. Área de estudio

#### II.1.1. Ubicación

El trabajo fue realizado en las instalaciones de la Estación Local Chama, adscrita al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas del estado Zulia (INIA-Zulia), ubicada en el Km 41, de la carretera que conduce de Santa Bárbara de Zulia a El Vigía, en la parroquia Morality del municipio Colón del estado Zulia (figura II-1), a una altitud de 54 msnm (08°43'27" N, 71°44'33" O). En total la Estación Local Chama consta de 100 Ha, dedicadas principalmente a ganadería y frutales (plátano, cacao, guanábana y parchita). La investigación en musáceas, principalmente en plátano es orientada al manejo agronómico (densidades de siembra, fertilización, control de plagas y enfermedades, bioinsumos), evaluación de materiales tolerantes a la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) y se mantiene un banco de germoplasma donde se evalúan materiales comestibles y ornamentales.

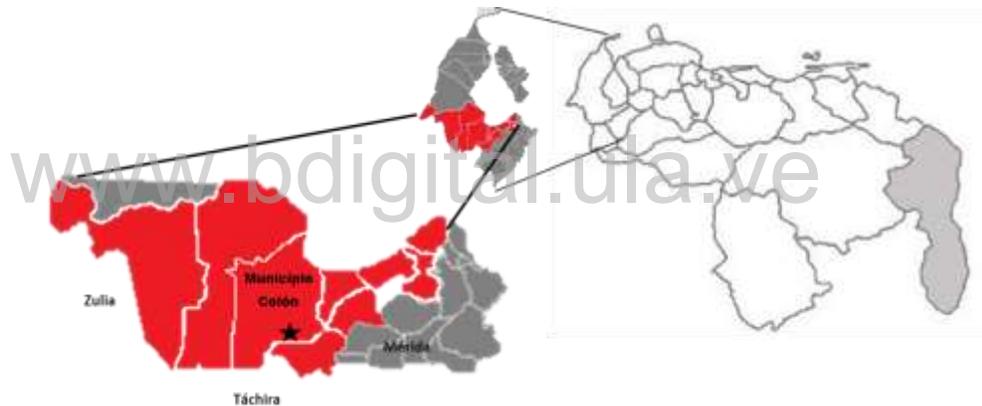


Figura II-1. Ubicación del área de estudio dentro de la zona Sur del Lago de Maracaibo. La Estación Local Chama INIA-Zulia se señala con una estrella.

#### II.1.2. Características generales de la Estación Local Chama

##### VARIABLES CLIMÁTICAS

El análisis climático que se presenta a continuación se basa en información disponible que fue colectada dentro de la Estación Local Chama, sin embargo la medición no ha sido continua en el tiempo y los períodos de medición pueden no ser iguales para todas las variables. A parte de los datos colectados dentro de la Estación Local Chama, la estación climática más cercana que tiene mediciones de larga data es el Aeropuerto de El Vigía, situada a 20 km, que presenta diferencias importantes en cuanto a la precipitación, probablemente por su mayor cercanía al piedemonte andino.

### - Precipitación

La precipitación media anual fue de 1526 mm entre los años de 1953 a 1968 y para el período entre 1995 a 2012 de 2193 mm (figura II-2); en esta misma figura, se observa que desde el año 2004, ocurre un cambio en la magnitud de las precipitaciones, antes de ese año, en el período 1995 a 2003 el promedio fue de 1747 mm, 221 mm superior con respecto al promedio de 1953 a 1968, pero en el período de 2004 a 2012, el promedio fue de 2641 mm, 894 mm superior al período próximo anterior y 1115 mm superior al de los años 1953-1968. Esto pareciera indicar que ha estado ocurriendo un aumento marcado en los montos de precipitación, al menos localmente, particularmente a partir de 2004, el cual se ha mantenido hasta el presente, pudiendo acentuar la frecuencia de los problemas de inundaciones en la zona y el incremento de los problemas de enfermedades en los cultivos, tal como está reportado.

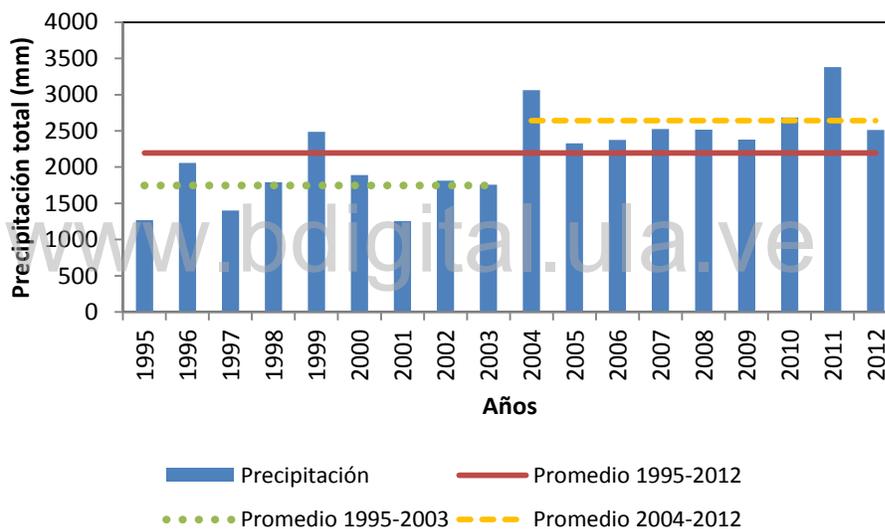


Figura II-2. Evolución de la precipitación anual desde 1995 a 2012 en la Estación Local Chama – INIA – Zulia. Se indica el promedio de todo el intervalo así como los promedios de los períodos 1995 a 2003 y 2004 a 2012.

En la figura II-3, se presentan los promedios mensuales de precipitación para el período 1995-2012, así como, la amplitud mensual de la precipitación de dicho período, donde se observa que el promedio mensual está siempre por encima de 100 mm. En los meses de enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre existe mayor amplitud a diferencia de los meses de julio, agosto, septiembre y octubre donde es menor, por lo tanto, la incertidumbre de la cantidad de lluvia es mayor conforme la amplitud aumenta de año en año (base de datos de la Red Bioclimática-ULA, base de datos climáticos de la Estación Local Chama y estación automática del ensayo).

- Temperatura

La temperatura media mensual fue de 28,2 °C, con mínima promedio de 25,9 y mínima absoluta de 15,5 y una máxima promedio de 31,4 y absoluta de 42,3 °C, durante el período 2002-2005.

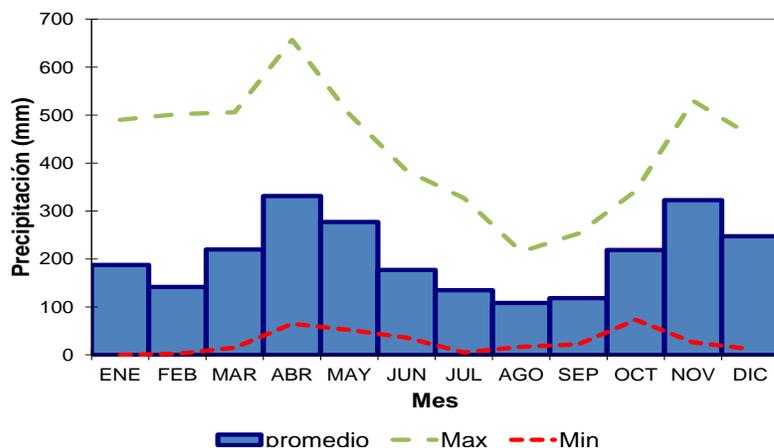


Figura II-3. Promedio de la precipitación mensual y amplitud de la precipitación del período 1995 – 2012, en la Estación Local Chama – INIA – Zulia.

- Climadiagrama

Se observa que climáticamente ( $pp \leq 2T$ ) no existen meses secos para el período (figura II-4), aunque para el cultivo plátano, según señala Belalcázar (1991), los meses por debajo de 150 mm de precipitación, representan meses con déficit de agua para el buen desarrollo del cultivo y en los meses húmedos, se presentan volúmenes de agua en superficie en exceso, que son manejados a través de zanjas de drenaje en las áreas cultivadas.

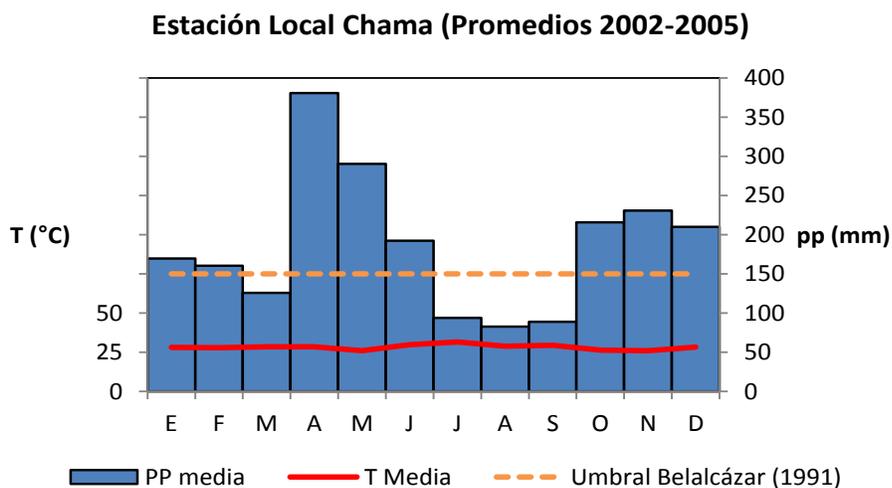


Figura II-4. Climadiagrama de la Estación Local Chama-INIA-Zulia, período 2002-2005. Barras azules corresponden a la precipitación promedio mensual y la línea roja a la temperatura media mensual.

- Humedad relativa del aire

Este parámetro es poco fluctuante durante el año, con promedios anuales de 85%. En la tabla II-1, se presentan los promedios mensuales durante el período 2001-2003 de la Estación Local Chama, donde se observa que se mantuvo alrededor de 80% y con promedio anual de 82%, con valores diarios mínimos de 77% en el año 2001 y máximos de 90% en el año 2003.

Tabla II-1. Promedio mensual de humedad relativa del aire durante el período 2001-2003 en la Estación Local Chama – INIA-Zulia.

%	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Promedio	84	81	80	86	85	83	82	79	79	81	84	85

- Viento

Los datos de velocidad del viento del sitio donde se desarrolló el trabajo corresponden a los años 2001 al 2003. En la tabla II-2, se muestra los valores promedios mensuales. Los valores diarios promedios, se sitúan como vientos suaves en la clasificación presentada por Allen *et al.* (2006), con valores máximos por el orden de 1,06 m.seg<sup>-1</sup> y dirección predominante hacia el N-NE y N-NO típicas para la zona.

www.bdigital.ula.ve

Tabla II-2. Promedio, máximo y mínimo de la velocidad del viento en la Estación Local Chama-INIA-Zulia. Años 2001-2003 (2 m).

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Velocidad del Viento máxima (m.seg <sup>-1</sup> )	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8
Velocidad del Viento promedio (m.seg <sup>-1</sup> )	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5
Velocidad del Viento mínima (m.seg <sup>-1</sup> )	0.3	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.2

-Radiación:

El promedio mensual obtenido de los datos de la zona durante el período 2002-2005 fue de 550,13 MJ.m<sup>-2</sup>.mes<sup>-1</sup>.

## Suelo

En la Estación Local Chama podemos encontrar cinco series de suelo, todos ellos de origen aluvial, con pendientes menores al 1% y drenaje interno de moderado a lento. Estas series son: serie Banchan en el 41% del área, con texturas arenosa y franco arenosa, serie Chama en el 25%, con textura franca con predominio de la fracción limo, serie Chamita en el 15%, con textura franca y predominio de arena fina y muy fina, serie Raya en el 9%, con textura franca y franco limosa, con predominio de la fracción fina y serie Padre en el 1%, con textura franco arcillosa y franca, con predominio de la fracción limo (Márquez, 1979; Kijewski *et al.*, 1981).

## Vegetación

Actualmente, el grado de reemplazo de la vegetación natural del área que ocupa la Estación Local Chama ha sido casi total, donde se sustituyó la selva húmeda tropical por un área con pasto estrella (*Cynodon plectostachium*) y guinea (*Panicum maximun*), diversos agroecosistemas perennes como cacaotales criollos, frutales como musáceas, guanábanas, agroecosistemas anuales como parchita, flor de jamaica, lechosa entre otros. Los relictos de vegetación natural con bajo nivel de intervención se ubican a orillas del cauce de los caños que la atraviesan y se mantiene un área de 3 ha con la selva original.

### II.1.3. Características del lote seleccionado

En el área del jardín de musáceas de la Estación Local Chama, se seleccionó un lote de terreno de 5000 m<sup>2</sup>, aparentemente uniforme, perteneciente a la serie Chamita. Este lote, ubicado a 50 metros aproximadamente de un brazo del Caño Padre, ha sido cultivado con plátano por más de 20 años de forma permanente.

#### Información climática durante la fase de campo

##### - Monitoreo de variables climáticas

El monitoreo durante el período de estudio, se realizó por medio de una estación meteorológica automática marca HOBO instalada a 30 m de la parcela, siguiendo las normas de establecimiento de estaciones climáticas (OMM, 1996) es decir en un lugar descubierto, con grama corta y altura de instalación de sensores a 2 m. Se registraron las variables de precipitación total, temperatura, humedad relativa y radiación solar cada cinco minutos.

Para el procesamiento de los datos de precipitación, se utilizó un algoritmo implementado en R (Ablan, 2009), para calcular el número de eventos con el criterio de separación de una hora, así como las características propias de cada evento: magnitud, intensidad y duración.

- Información climática:

Precipitación: la precipitación acumulada durante los 10 diez meses del ciclo del cultivo que duró el ensayo de campo (junio 2010 a abril de 2011), alcanzó 2163 mm, similar al promedio anual del período de 1995-2012 de 2193 mm. En el período de seis meses (Noviembre-Abril), en que se realizaron las mediciones simultáneas de todos los flujos del balance hídrico, la precipitación fue de 1533 mm, 6 % superior a la precipitación para el mismo período entre los años 1995-2012 que fue de 1450 mm.

La precipitación se caracterizó por presentar alto porcentaje de eventos de magnitud, intensidad y frecuencia relativamente bajos y por presentar valores muy extremos (figura II-5). En el período de cultivo, que duró 293 días, se registraron un total de 290 eventos de precipitación en tan sólo 121 días con lluvia (41%) y 172 días sin llover (59%).

En la figura II-5, se presentan las características de los eventos de precipitación, se puede observar la magnitud, en la figura II-5A, con el 74% de los eventos en la clase de 0 a 5 mm, la próxima clase de 5 a 10 mm cuenta con el 11% y sigue en descenso hasta clases de magnitudes altas de 65 a 70 que presentaron el 0,34%. La figura II-5B ilustra la intensidad de los eventos, donde la clase de 2 a 4 mm.h<sup>-1</sup> incluyó el 70% de los eventos y la clase de 6 a 8 mm.h<sup>-1</sup> el 7 % de los eventos e intensidades altas, como por ejemplo de 46 a 48 mm.h<sup>-1</sup> el 1%.

La duración de la precipitación se presenta en la figura II-5C, donde se observa que la clase de 0 a 0,5 h englobó el 63% de los eventos, la clase de 0,5 a 1 h el 15% y los eventos más largos de la clase de 6 a 6,5 h 0,34% correspondiente a un sólo evento.

Temperatura: el promedio del período bajo estudio fue de 26,4 °C, por debajo en 1,8 °C del promedio histórico reportado para la zona, probablemente por una disminución de las horas de insolación debido a la gran pluviosidad, con una máxima absoluta de 35,1 °C y mínima absoluta de 20,1 °C, que está en el rango recomendado para el cultivo y los valores generales de la zona.

Humedad relativa del aire: durante el período de desarrollo de la investigación se presentó un promedio mensual de 94% con máximo de 99 y mínimo de 86%, que representa un período húmedo en comparación con los datos históricos mostrados.

Radiación: el promedio obtenido durante el estudio fue de  $447,62 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{mes}^{-1}$ , que representó un valor menor al promedio mensual de la zona durante el período 2002-2005 de  $550,13 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{mes}^{-1}$ .

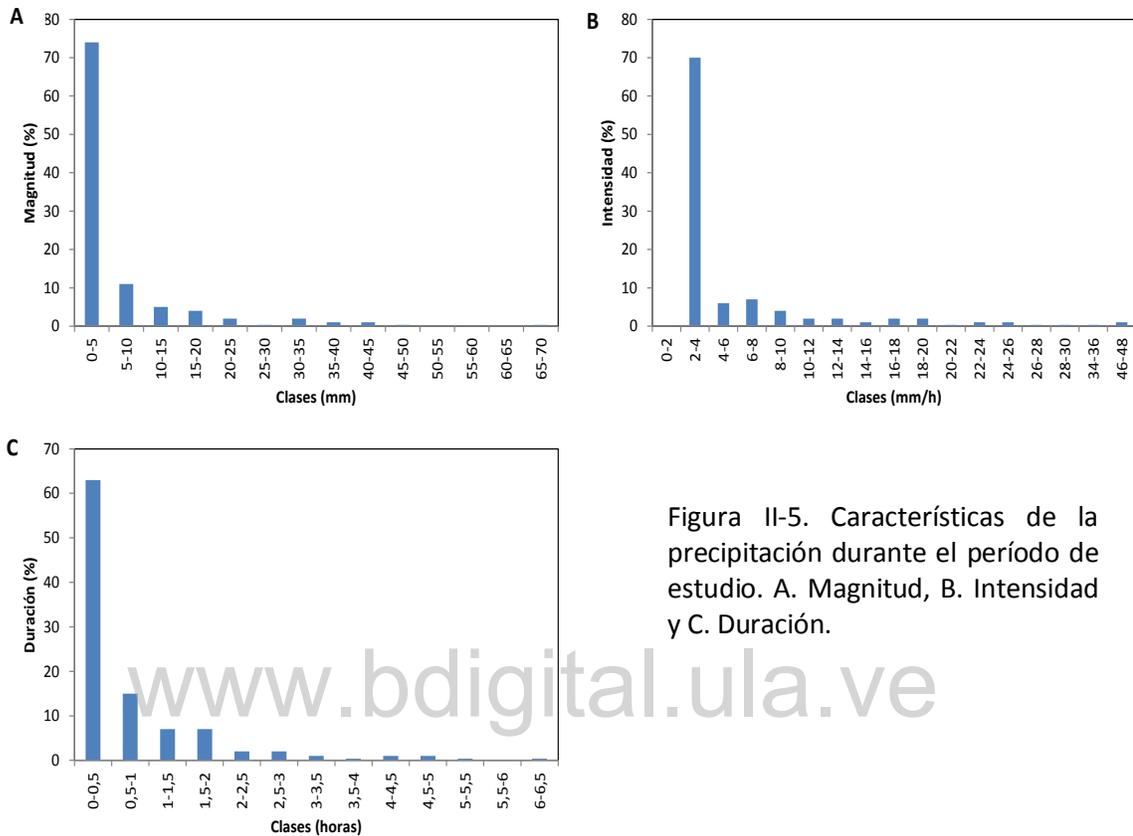


Figura II-5. Características de la precipitación durante el período de estudio. A. Magnitud, B. Intensidad y C. Duración.

### Características del Suelo

El suelo donde se realizó el estudio pertenece a la serie Chamita, clasificado como Fluventic Eutropepts, limoso grueso (Márquez, 1979). La serie Chamita, se presenta en un área de 19.069 hectáreas del sector entre el Río Mucujepe – Río Escalante (Kijewski *et al.*, 1981), representando la cuarta serie más extensa de las 43 descritas en dicho estudio. Presenta un relieve plano con pendientes entre 5 hasta 1%, está ubicada en napas de limo de desborde Qo, en áreas que pueden ser esporádicamente inundadas por tiempo reducido, por el desborde de los colectores o presentar encharcamiento por agua de lluvia. La textura predominante es Franca, con predominio de la arena fina y muy fina, estratificada a veces con texturas franco o franco limosas en proporciones alrededor del 50% en los primeros 100 cm del suelo y texturas arenosas a mayor profundidad. La estructura es blocosa subangular, débilmente desarrollada y fácilmente destruible y el drenaje es entre moderado a bueno (Kijewski *et al.*, 1981).

- Perfil del suelo

Como parte de los estudios exploratorios realizados antes de la instalación del ensayo, en el mes de mayo 2010, se realizó una calicata (2x1x1 m) con la finalidad de verificar la serie de suelo a través de la descripción del perfil, así como tener información de la profundidad máxima de las raíces del cultivo de plátano, para poder planificar los muestreos de fitomasa subterránea y establecer la profundidad para instalar los lisímetros (tabla II-3, figura II-6). Esto permitió verificar que el suelo pertenece a la serie Chamita, similar a la descrita por Kijewski *et al.* (1981).

Tabla II-3: Descripción del perfil de suelo en una calicata realizada para la caracterización de la parcela experimental

Prof. (cm)	Descripción
0 – 13 A1	Materia orgánica (MO) abundante, muchas grietas, sin esqueleto, sin graba, sin piedras, estructura prismática, tamaño de agregado > 10 mm, friable (húmedo), límite claro, también se presenta estructura granular por actividad microbiana, abundantes raíces, se observan grietas hasta una profundidad de 38 cm continuas. Textura Franco-Arcillo-arenosa.
14 – 31 A2	Reducción muy grande de materia orgánica, estructura blocosa angular < 5 mm, friables (húmedo) masiva, límite abrupto, abundantes raíces, Textura Franco-Arcillo-limosa.
32 – 51 B1	Estructura prismática con < 5 mm, friable (húmedo) Textura Arcillo-Limosa.
52 – 71 B2	Sin estructura, tiende a tener una estructura prismática suelta, límite abrupto, puede ser producto de la migración de MO, pocas raíces, Textura Arcillo-Arenosa.
72 – 104 BC	Similar a la de 14-51 cm, proceso de óxido-reducción e hidromorfismo, pocas raíces, Textura Arcillo-Limosa.



Figura II-6. Perfil del suelo en la calicata realizada para el estudio exploratorio previo a la instalación del ensayo.

#### - Diagnóstico textural del lote de estudio

Dada la importancia que tiene la textura del suelo sobre los procesos del balance hídrico (retención de agua, conductividad hidráulica) y sobre la dinámica del nitrógeno (capacidad de intercambio catiónico, tasas de descomposición de la MO) se realizó un estudio preliminar espacializado de la textura de la parcela donde fue instalado el ensayo. La determinación de la textura al tacto, en el lote seleccionado de 110 x 45 m, se efectuó con barreno cada 10 m, en una cuadrícula de 10 x 10 m de separación entre puntos de muestreo, resultando cuatro filas por 11 columnas cada una, para un total de 44 puntos, con el fin de tener una visión de su heterogeneidad y en base a esto distribuir las réplicas. Los resultados obtenidos se presentan en la figura II-7, que muestra la heterogeneidad presente, en resumen se tiene que entre 0 a 10 cm de profundidad predominaron las texturas Franco arcillo arenosa y arcillo arenosa, entre 10 a 50 cm predominó la Franco arenosa y Franco arcillo limosa y entre 50 a 70 cm, las texturas predominantes fueron la arcillo arenosa y arcillo limosa.

Este procedimiento, permitió efectuar la separación del lote experimental en tres parcelas en función de la textura de las dos primeras capas de estudio (figura II-7), la primera con textura de 0 a 10 cm entre FAa y Aa, de 10 a 50 cm Fa y de 50 a 70 cm Aa, la segunda con textura de 0 a 10 cm de Aa y Fa y de 10 a 50 cm con predominio FAa y de 50 a 70 cm A y Aa y la tercera presentó texturas de 0 a 10 cm de Aa y FAa, de 10 a 50 cm Fa a FA y de 50 a 70 cm Aa.

#### Determinación exploratoria de la distribución de raíces en el suelo

La determinación de la profundidad radicular del cultivo de plátano, se realizó en una plantación establecida al lado del lote experimental, en una planta de buen desarrollo en estado de prefloración, donde se tomaron muestras con cilindros metálicos de 15,5 cm de diámetro, cada 10 cm, hasta los 100 cm de profundidad. Con este fin se colocó a 20 cm desde el cormo, frente a la planta, un cilindro y los otros dos a los lados del primero separados a 10 cm. Las muestras de suelo fueron lavadas para extraer las raíces y las mismas fueron secadas en estufa por 48 horas a 70°C y pesadas, luego se determinó el porcentaje de raíces por capa; éste procedimiento, permitió la selección de las capas a considerar en los muestreos destructivos y análisis de nitrógeno posterior.

La distribución vertical de las raíces de la planta de plátano obtenida con el procedimiento descrito, se muestra en la tabla II-4, donde se observa que en la capa de 0 a 50 cm de profundidad se localiza el 95% de las raíces de la planta, con ese criterio, se decidió tomar esa profundidad para

las evaluaciones de los parámetros seleccionados en la tesis y se separó en dos capas, la primera de 0 a 20 cm, que contiene el 70% de las raíces y la segunda de 20 a 50 cm que contiene 25%, quedando por fuera el restante 5%.

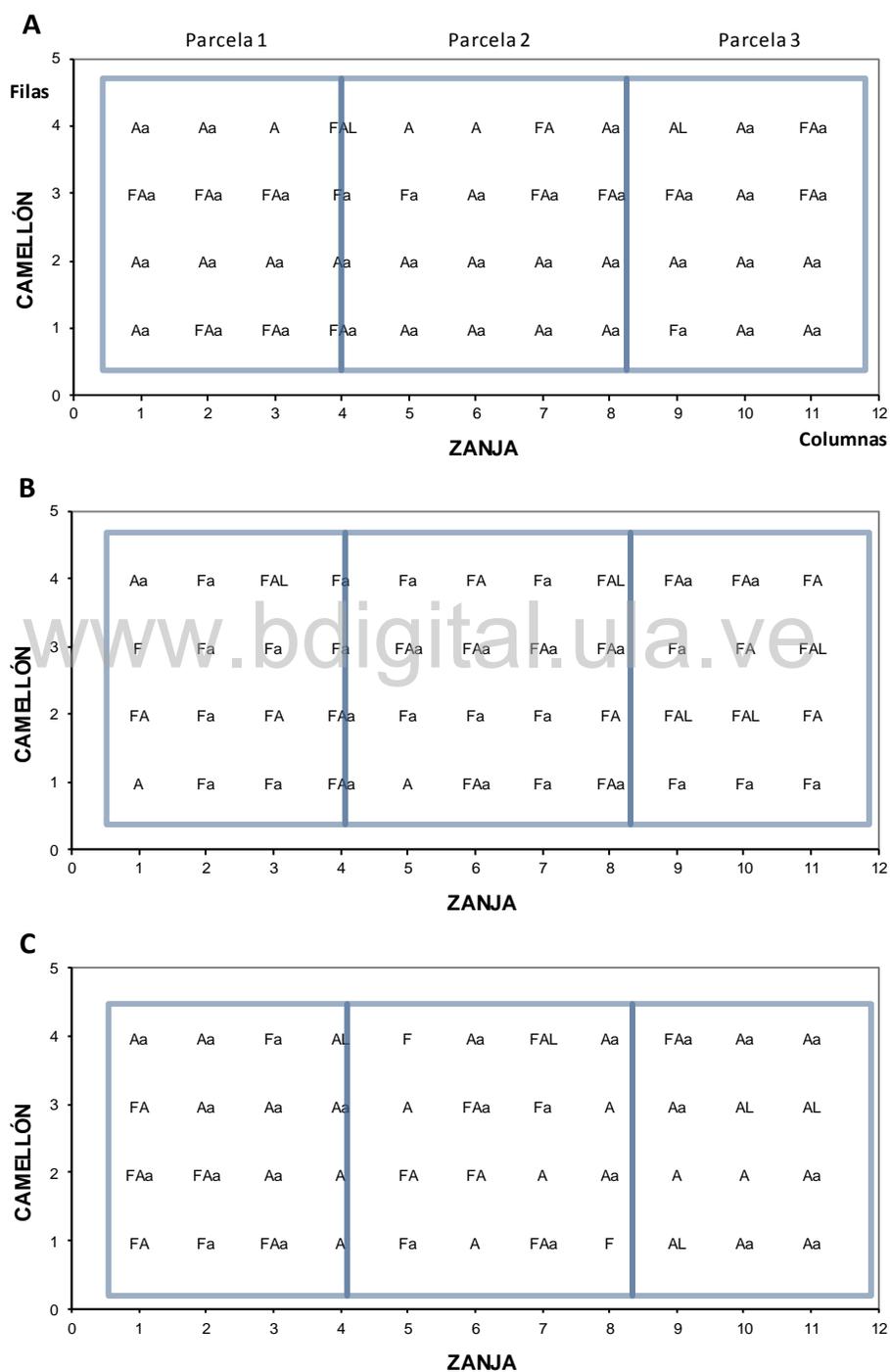


Figura II-7. Textura al tacto del lote seleccionado para la instalación del experimento de campo. A. Textura de 0 a 10 cm; B. Textura de 10 a 50 cm; C. Textura de 50-70 cm.

Tabla II-4. Distribución porcentual de las raíces de una planta de plátano Hartón en estado de prefloración, Estación Local Chama, INIA-Zulia.

Prof. (cm)	Raíces (mg.cm <sup>-3</sup> )	%	%acum
0-10	2,07±0,75	52	52
10-20	0,60±0,43	15	67
20-30	0,43±0,31	11	78
30-40	0,39±0,21	10	88
40-50	0,26±0,23	7	95
50-60	0,11±0,09	3	98
60-70	0,07±0,01	2	100
70-80	0	0	100
80-90	0	0	100
90-100	0	0	100

#### Análisis físico-químico del suelo

De los estudios exploratorios que se reportaron anteriormente, se decidió dividir el área experimental en tres parcelas y se estableció la profundidad de muestreo del suelo en 50 cm, dividida en dos capas de 0-20 cm y de 20 a 50 cm. El análisis físico-químico del suelo se realizó en cada una de las tres parcelas delimitadas en función de la textura. En cada una se tomaron 15 barrenadas distribuidas en una cuadrícula de 10 x 10 m para formar una muestra compuesta. Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Suelo, del Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes, determinándose los siguientes parámetros: textura (Bouyoucos, 1962); pH por potenciometría (IGAC, 1978); C orgánico por método de Walkley-Black (IGAC, 1978); CIC por extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 (IGAC, 1978); retención de humedad a 1/3 y 15 Atm por método de olla y plato de presión (Klute, 1986); N total por el método de Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982); P disponible por extracción por el método Bray I y determinación colorimétrica a 660 nm (ICA, 1989); Ca, Mg, Na y K y disponibles por extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 y espectrofotometría de absorción atómica (IGAC, 1978).

En la tabla II-5, se presentan los resultados obtenidos del análisis de suelo del área experimental, donde se observan un aumento importante de los porcentajes de arena con la profundidad e inverso para los porcentajes de arcilla en las tres parcelas. Esta característica de la distribución de las arcillas se relaciona claramente con la capacidad de retención de agua, viéndose como el punto de marchitamiento y la capacidad de campo aumenta con la cantidad de arcilla. También se observa un claro gradiente de aumento del porcentaje de arcilla entre las

parcelas 1 hasta la 3, lo cual valida la delimitación de las parcelas que se realizó con el método de determinación de arcillas al tacto.

El pH es moderadamente ácido, que condiciona una baja disponibilidad de nitratos y calcio, sin problemas de disponibilidad para los demás nutrientes, no se presentan problemas de toxicidad con aluminio y hierro; la conductividad eléctrica es baja por lo que es un suelo no salino que no afecta el crecimiento de los cultivos (USDA, 1999).

En base a los resultados el suelo presenta limitaciones debido a que la mayoría de los elementos se encuentran en niveles de medios a muy bajos, solo el fósforo presenta niveles altos; igualmente la relación C/N y la capacidad de intercambio catiónico son bajas, esta condición del suelo puede ser producto de la dinámica hídrica de la zona caracterizada por altas precipitaciones y una temperatura adecuada que favorecen la pérdida de nutrientes que además es favorecida por la textura y la baja retención de humedad. Sin embargo, llama la atención la alta saturación de bases del complejo de intercambio catiónico, principalmente atribuible al Ca, lo cual indica que el potencial de pérdida por lixiviación no es tan alto ya que la saturación de bases puede superar el 100%. También se realizó un análisis de fraccionamiento de arena, el cual indicó la presencia de arenas finas y muy finas por el orden del 30% en la capa de 0 a 20 y 69% en la capa de 20 a 50 cm, la cual indica que el suelo tiende a partículas finas, lo cual pudiera limitar la conductividad hidráulica del mismo.

#### Nitrógeno total inicial en el suelo y su distribución espacial

Se realizó un muestreo del nitrógeno total inicial siguiendo la misma metodología explicada para la toma de muestras para textura al tacto, en las dos capas seleccionadas. Su determinación fue realizada por el método Kjeldahl (Bradstreet, 1965, AOAC, 1990), en el laboratorio del ICAE-Fac. Ciencias-ULA. Luego de obtenidos los resultados se efectuó un análisis de variograma y una interpolación de Kring, con el programa GS+ Geostatistics, para la determinación de la distribución espacial del nitrógeno.

El nitrógeno total inicial, en el variograma isotrópico se ajustó a un modelo tipo Gaussiano con un  $r^2$  de 0,69 para la profundidad de 0-20 y  $r^2$  de 0,80 para la profundidad de 20-50 cm. Como se observa en la figura II-8, existe en las dos profundidades una área localizada hacia la parte del camellón (a la izquierda de la figura), con los valores más bajos de nitrógeno, que progresivamente van aumentando y es más uniforme en la medida que se aleja del frente del lote (camellón). Se observa una relación directa con el comportamiento de la textura, donde el contenido de nitrógeno es mayor donde hay texturas más arcillosas, lo cual se explica probablemente por la

protección que ejercen las arcillas de la materia orgánica del suelo (Van Veen y Kuikman, 1990). En general puede decirse que los valores de nitrógeno son bajos y disminuyen con la profundidad. También se observa que coincide bastante bien con los valores medidos en las muestras compuestas (tabla II-5).

Tabla II-5. Análisis de suelo de la parcela experimental.

Parcela	Prof (cm)	Granulometría %			Clase Textural	% retención de agua	
		Arena (a)	Limo (L)	Arcilla (A)		1/3 Atm	15 Atm
1	0-20	47,6	36,4	16,0	F	22,9	6,8
	20-50	58,2	34,9	7,0	Fa	13,3	2,7
2	0-20	49,6	32,4	18,0	F	24,5	7,0
	20-50	53,1	36,9	10,0	Fa	18,2	3,6
3	0-20	37,6	36,4	26,0	F	30,7	10,1
	20-50	41,6	44,4	14,0	F	24,9	5,1

Parcela	Prof (cm)	pH	Conductividad eléctrica (ds/m)	Carbono orgánico (%)	Nitrógeno (%)	Relación C/N	Fosforo (ppm)
	20-50	5,61	0,001	0,81	0,06	13,59	31,0
2	0-20	5,64	0,002	1,52	0,13	11,69	40,6
	20-50	5,44	0,001	0,91	0,11	8,27	27,4
3	0-20	5,88	0,001	1,01	0,10	10,10	32,2
	20-50	6,14	0,001	0,51	0,05	10,20	19,9

Parcela	Prof (cm)	Bases Cambiables (Cmol.kg <sup>-1</sup> )				CIC (Cmol.kg <sup>-1</sup> )	SB (%)
		Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio		
1	0-20	7,80	1,48	0,004	0,28	11,00	86,95
	20-50	3,40	0,82	0,004	0,18	5,78	76,19
2	0-20	6,50	1,40	0,004	0,23	9,08	89,58
	20-50	7,95	1,40	0,004	0,18	8,00	119,18
3	0-20	6,00	1,23	0,004	0,20	10,00	74,34
	20-50	4,8	0,90	0,004	0,18	5,53	106,40

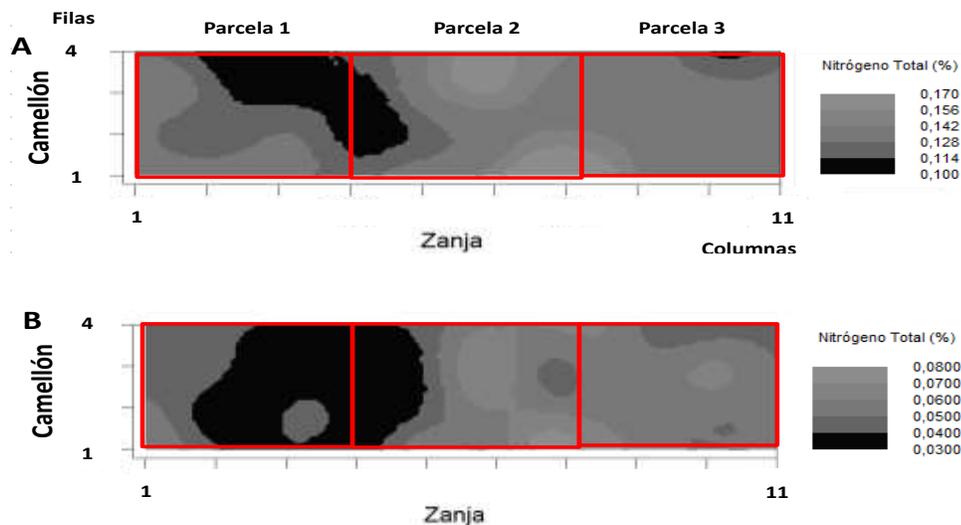


Figura II-8. Distribución espacial del nitrógeno total del suelo en el lote experimental. A. Profundidad 0-20 cm. B. Profundidad 20-50 cm realizado por kriging a partir de la cuadrícula de puntos.

## **II.2. Diseño agronómico y mediciones para la dinámica de crecimiento y absorción de nitrógeno**

### **II.2.1. Diseño agronómico**

El lote experimental, fue sembrado a una densidad de 1976 plantas.ha<sup>-1</sup>, a distancia de 2,25 m x 2,25 m con una planta por punto, para un total de 988 plantas en 5000 m<sup>2</sup>. Para los muestreos de fitomasa en su conjunto se seleccionaron 24 plantas de cada parcela para un total de 72 plantas en los 10 muestreos efectuados, que representan menos del 10% de las plantas totales, de forma que el desarrollo de la plantación debe haberse visto afectado mínimamente por la extracción en los diferentes muestreos de estas plantas. La selección de las mismas se efectuó por medio de una tabla de números aleatorios, considerando el número de fila y columna de cada planta (figura II-12). En cada uno de los diez muestreos destructivos, se tomó igual cantidad de plantas por parcela, se seleccionaron para los dos primeros muestreos tres plantas y para el resto seis plantas, quedando un número de plantas adicionales con el fin de disponer de reemplazo por si se perdía alguna planta efectiva. El aumento en el número de plantas muestreadas entre los dos primeros y el resto de los muestreos se realizó debido a la variabilidad encontrada. Alrededor de cada planta muestreada, se dejaron las plantas de borde, no muestreando en ningún caso plantas que no estuvieran rodeadas por otras, con el fin de evitar diferencias en el crecimiento por la pérdida de competencia o modificación de la conformación del dosel, niveles de luz y agua (efecto de borde).

### **II.2.2. Dinámica de crecimiento**

La dinámica de crecimiento de la planta (figura II-9) se analizó considerando desde el cormo sembrado hasta la cosecha del racimo, para ello se conformó una metodología modificada de los trabajos realizados por Samuels *et al.* (1978), Belalcázar *et al.* (1999) y Aristizábal y Jaramillo (2010).

Los muestreos (M) destructivos se iniciaron con el análisis del cormo antes de la siembra (M1) y luego de ésta, se consideraron las siguientes etapas de crecimiento: preemergencia de la planta (M2) que comprendió el período entre la siembra del cormo a la emergencia de la planta a nivel de la superficie del suelo; 6 estados de emisión de hojas desde la hoja 3 hasta la hoja 31 (M3 hasta M8), sigue la etapa de emergencia de la bellota a través de la corona de hojas (M9); luego se iniciaron los muestreos del período productivo, correspondiente al crecimiento de los frutos, realizados a los 247 DDS (M10) que corresponde a los 28 días después de la emergencia de la bellota (DEB) y a los 293 DDS (M11) a los 74 DEB (figura II-9 y tabla II-6).

Para los análisis destructivos de fitomasa se consideraron 10 compartimientos para la planta madre y cinco para el hijo; los compartimientos de la fitomasa aérea incluyeron:seudotallo, hojas, racimo (distinguiendo las distintas estructuras reproductivas: brácteas, flores, raquis y dedos), necromasa de hojas, seudotallo e hijos extras, fitomasa subterránea representada por el cormo y las raíces e igualmente al momento de iniciar la aparición de hijos se seleccionó uno como sucesor que se dividió en compartimientos iguales que la planta madre. Respecto al nieto sucesor, los hijos y nietos extras, fueron asignados cada uno a un compartimiento (tabla II-6).

#### Fitomasa aérea

El seudotallo, luego de separado del cormo y de las hojas, se pesó en fresco, luego se efectuaron tres cortes transversales para tomar tres submuestras representativas para determinar el contenido de agua y poder estimar la materia seca (MS).

Las hojas fueron separadas del seudotallo, marcadas siguiendo la filotaxia y se midió el largo y el ancho de cada una, para determinar el área foliar. Con este fin se utilizó la ecuación de largo x ancho x 0,80 (Aristizábal, 2008). Luego cada hoja se pesó en fresco y se tomó una muestra de 15 cm de la parte central (lámina y nervadura), para luego preparar una muestra compuesta en el laboratorio para la determinación del peso seco.

Tabla II-6. Muestreos considerados en el crecimiento de la planta de plátano, etapas fenológicas y número de compartimientos muestreados para la madre, los hijos y los nietos.

N° Muestreo	Descripción	DDS	Número de Compartimientos				
			Madre	Hijo principal	Hijos extras	Nieto	Nietos extras
1	Cormo	0	1				
2	Preemergencia	28	3	1	1		
3	Hoja 3	43	4	1	1		
4	Hoja 7	57	4	2	1		
5	Hoja 13	98	6	4	1		
6	Hoja 19	134	6	4	1	1	1
7	Hoja 25	157	6	5	1	1	1
8	Hoja 31	198	8	5	1	1	1
9	Emer. Bellota	219	10	5	1	1	1
10	Racimo 1	247	10	5	1	1	1
11	Cosecha	293	10	5	1	1	1

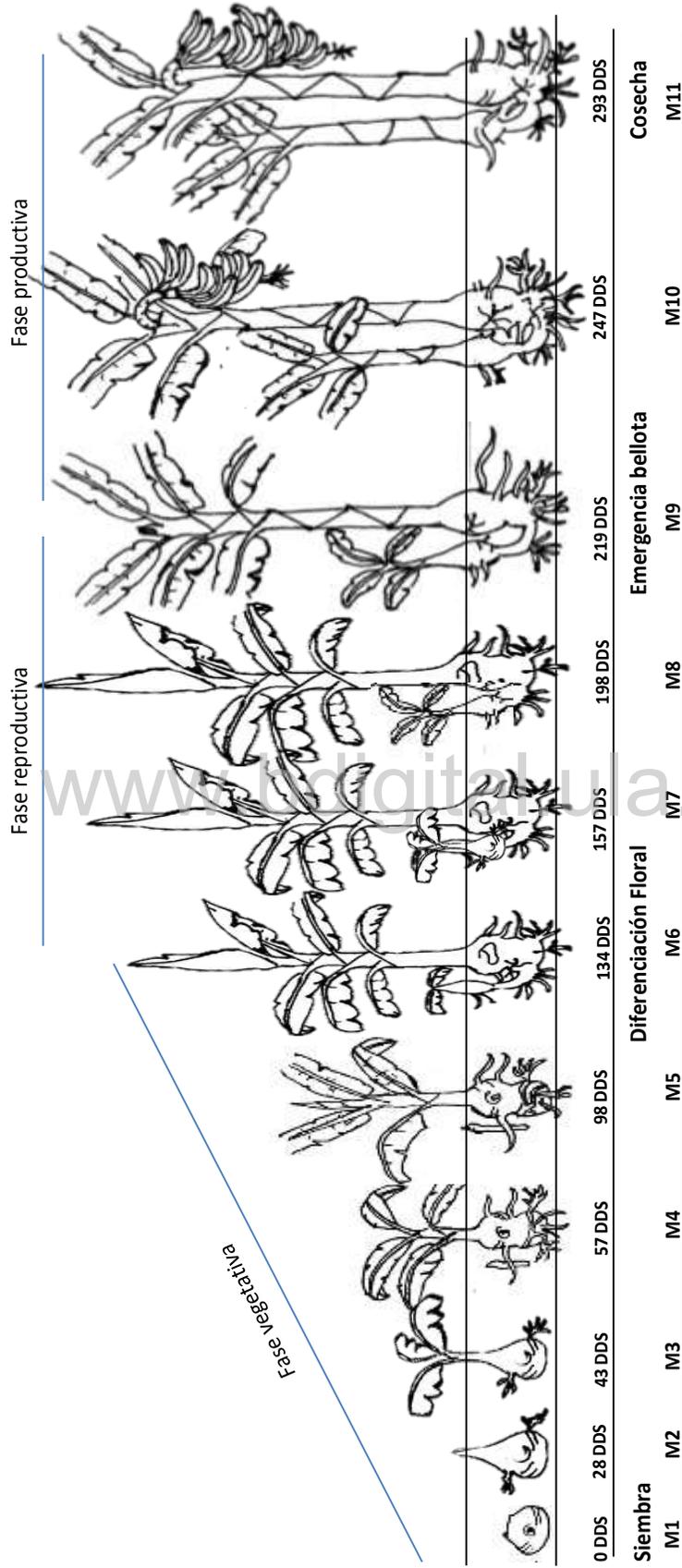


Figura II-9. Representación del ciclo productivo del plátano Hartón (*Musa AAB*), bajo las condiciones del estudio indicando los períodos en que se realizaron los diferentes muestreos

Al momento de la emergencia de la bellota se inició el seguimiento de las brácteas y flores, el cual se efectuó tres veces a la semana para recolectar todas las estructuras en las plantas seleccionadas y evitar su pérdida al caer de la planta. Las brácteas, flores y raquis, se tomaron y se pesaron en fresco y dependiendo del volumen se tomaba todo el órgano o una muestra para la determinación del contenido de agua. Al momento del muestreo destructivo de la planta se separaban del raquis en su totalidad y se sumaban al material recolectado previamente de cada compartimiento (brácteas o flores).

El racimo, se cortó a nivel de las hojas, se tomó peso total en campo y luego se procedió en el laboratorio a pesar el raquis y los dedos.

La necromasa de hojas y seudotallo se recolectó, luego de cada ciclo de deshoje de todas las plantas seleccionadas, al momento del muestreo destructivo se mezclaba la necromasa parcial para obtener la muestra compuesta, para la determinación de peso seco y nitrógeno. Esta forma continua de recolección de las hojas y seudotallo permitió calibrar la dinámica del corte de hojas y seudotallo del modelo. Para los efectos de la dinámica de crecimiento se decidió establecer un sólo compartimiento de necromasa en cada planta que incluyó la necromasa de hojas, seudotallo, hijos extras y nietos extras.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

#### Fitomasa subterránea

El cormo, que representa el único compartimiento en el muestreo 1, se analizó con la selección al azar de 12 cormos del lote a ser sembrado. En los sucesivos muestreos, el cormo se cortó en el campo a nivel de la unión con el seudotallo y luego de lavado se determinó el peso fresco, se tomó una muestra representativa, para estimar peso seco y nitrógeno.

Se decidió invertir tiempo y esfuerzo para la determinación de las raíces debido a que es el órgano de la planta que suele estudiarse menos y por lo tanto del que hay menos información disponible, a pesar de su importancia funcional en la absorción de agua y nutrientes. Para su análisis se consideraron las dos dimensiones espaciales. Verticalmente se muestreó a las profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 50 cm y horizontalmente se muestreó de forma representativa el área correspondiente a una planta (2,25 x 2,25 m). Con este fin se consideró el sitio de siembra, donde está el cormo, como el centro del área, con una dimensión de 0,40 x 0,40 m y a partir de allí se trazó una cruz siguiendo los puntos cardinales (N, S, E y O) hasta una distancia de 1 m. El barreno se colocó a los 0,50, 0,70 y 0,90 m (figura II-10) en las cuatro direcciones, que conforman anillos alrededor de la planta, para el área explorada por la planta se

consideró una circunferencia de 1 m que representa un área 3,14 m<sup>2</sup> (círculo externo en la figura II-10). La toma de muestras de las raíces, se realizó con un barreno de 7 cm de diámetro y 10 cm de alto. Según Blomme *et al.* (2005b) este método podría estimar el tamaño completo del sistema radical con al menos un 80% de exactitud.

El suelo alrededor del cormo, en la profundidad 0-20 cm, se colectó y lavó en su totalidad, considerando un cuadrado de 0,40 x 0,40 m para los primeros 6 muestreos y de 0,80 x 0,80 m para los restantes (figura II-10). En el mismo cuadrado, pero por debajo de 20 cm se hizo un muestreo con barreno. Todas las muestras se colocaron en bolsas plásticas identificadas y llevadas al área de lavado, donde se les eliminó la tierra con agua a baja presión y se realizó la separación del cormo y las raíces del centro y de las muestras tomadas con barreno. Con este fin el suelo fue lavado sobre tamices de 2 y 0,5 mm, para recuperar el máximo de raíces del suelo, sin afectar negativamente el trabajo de lavado e intentando obtener muestras de raíces libres de partículas de suelo.

El peso de las raíces por planta se obtuvo luego de determinar el peso seco por cada elemento de muestreo (parte central y barrenos por punto cardinal y distancia), ya conocida el área del centro y de cada anillo, por regla de tres se determinó la cantidad de raíces, por distancia y punto cardinal, después se promedió el valor obtenido de cada uno por anillo, para sumarlos junto con el valor de la parte central y obtener el valor por planta, luego el valor de las seis plantas se promedió para obtener el valor de las raíces por cada muestreo.

No fue posible separar las raíces correspondientes a la planta madre de las del hijo. Para los cálculos, las raíces se distribuyeron entre madre e hijo proporcionalmente al peso del cormo de cada uno de ellos, tomando como ejemplo la relación planteada por Lecompte *et al.* (2002) con el número de raíces y el peso del racimo.

Con la dinámica de fitomasa del hijo sucesor, se efectuó similar procedimiento al descrito para la planta madre al momento de iniciar su desarrollo; con respecto, a los hijos extra y nietos se tomó cada uno como un único compartimiento y debido a que son cortados en la práctica de deshije, se sumaron todos al compartimiento de la necromasa de la madre o del hijo+nieto según corresponda.

Los órganos completos o muestras representativas para obtener el peso seco fueron secados en estufa a 70 °C hasta alcanzar peso constante (Laboratorio INIA-Zulia-Chama).

La determinación del nitrógeno en la fitomasa del cultivo se efectuó en las muestras secas de cada compartimiento para cada muestreo. Las muestras fueron molidas en un molino de cuchillas y algunas muestras del seudotallo, hojas y necromasa, debido a su naturaleza fibrosa,

fueron repasadas con un molino de bolas, para llegar a fragmentos menores a un 1 mm de tamaño de las partículas. La determinación del nitrógeno total se efectuó por el método de Kjeldahl (Bradstreet, 1965, AOAC, 1990), tomando como réplicas las plantas individualmente muestreadas en campo y efectuado en el Laboratorio del ICAE-ULA.

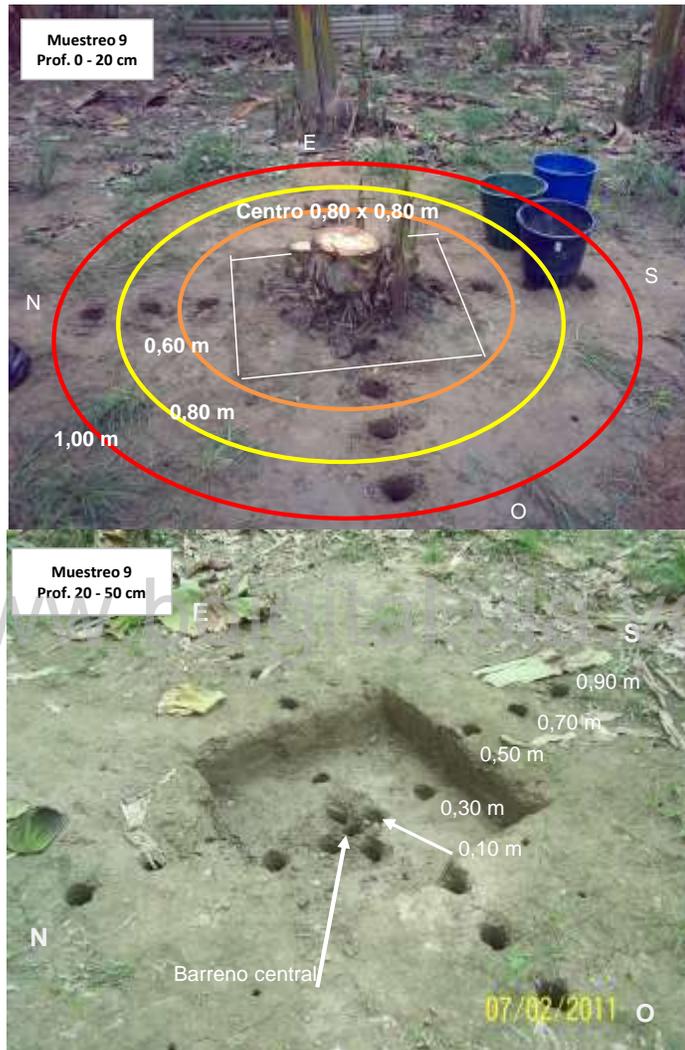


Figura II-10. Esquema de muestreo de raíces en campo, puede observarse como fue extraído un bloque central de 0,80 x 0,80 m entre 0-20 cm de profundidad, ubicado debajo delseudotallo. Se observan los huecos dejados por el barreno ubicados en una cruz que sigue los cuatro puntos cardinales. En cada hueco se separaron las muestras entre 0-20 y 20-50 cm. Ejemplo muestreo 9.

#### Dinámica de fitomasa y nitrógeno en las plantas y sus compartimentos

Con los datos obtenidos de cada muestreo, se evaluó la distribución de la fitomasa y nitrógeno en el cultivo, efectuando los siguientes cálculos: a) fitomasa de cada órgano (compartimento) y fitomasa total de la planta en  $\text{gMS.m}^{-2}$ , b) relación porcentual de la fitomasa

de cada órgano con respecto al total (%), c) cantidad de nitrógeno acumulada en cada órgano ( $\text{gN.m}^{-2}$ ), que fue calculada al multiplicar la MS por la concentración de nitrógeno del compartimiento en un tiempo dado. A los datos de fitomasa total de la madre se le realizó un análisis de medidas repetidas para determinar si existió efecto de bloque por las parcelas consideradas en el estudio.

La variación temporal de la fitomasa y del nitrógeno promedio de la unidad de producción, de la madre, del hijo, del nieto y de los órganos considerados fue ajustada a funciones matemáticas propuestas por Hunt (1982). Se seleccionaron las funciones que se ajustaron con mejor  $r^2$  y grados de libertad. Entre las ecuaciones evaluadas estuvieron las del tipo Gompertz, gaussiana, polinómica, exponencial y sigmoidea, lo cual se realizó con el programa Sigmaplot versión 8. La primera derivada de estas ecuaciones permitió obtener la tasa de crecimiento absoluto o la tasa de absorción de nitrógeno según el caso (Hunt, 1982). La tasa de migración de asimilados al racimo se calculó por diferencia entre la tasa absoluta de crecimiento de la madre y la tasa absoluta de crecimiento del racimo. La migración de asimilados de la planta madre al hijo se calculó por diferencia a partir de la tasa absoluta de crecimiento de la unidad de producción y la tasa absoluta de crecimiento del hijo. Igual procedimiento se utilizó para la determinación del nitrógeno aportado por la madre al racimo y al hijo.

#### Rendimiento del cultivo

El rendimiento del cultivo del plátano por hectárea se determinó en base al peso fresco del racimo de las seis plantas efectivas en el último muestreo y la densidad de plantas utilizada.

#### Radiación fotosintéticamente activa interceptada

Se calculó utilizando la ley de Lambert-Beer (Larcher, 2003):

$$\text{IPAR} = \text{PAR} * (1 - e^{(-k*\text{LAI})})$$

donde IPAR es la radiación interceptada, PAR es la radiación fotosintéticamente activa incidente,  $k$  es el coeficiente de extinción de la luz y LAI es el índice de área foliar. El valor diario de PAR se obtuvo de la radiación total medida en una estación meteorológica Marca HOBO, con un piranómetro, y registrada cada cinco minutos, la cual fue integrada para obtener un dato diario en la unidad de  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ , este valor se transformó a PAR considerando que la misma representa el 48% de la radiación global (Bonhomme, 1993). Para el valor de  $k$  se tomó 0,46, propuesto por Tunner (1994) para banano. Finalmente, el índice de área foliar por muestreo se obtuvo calculando el área foliar de la planta (largo x ancho x 0,80) y luego dividido por el área de la planta;

para calcular el LAI diario se realizó un ajuste del LAI de campo a lo largo del tiempo a una función polinómica. La IPAR acumulada se obtuvo a partir de los IPAR diarios.

#### Eficiencia en el uso de la radiación

La eficiencia del uso de la luz (RUE por sus siglas en inglés), en  $\text{gMS.MJ}^{-1}$ , se calculó para la madre, por medio de la relación entre el incremento de fitomasa, dividido por el incremento de la IPAR acumulada entre dos muestreos de fitomasa consecutivos, desde los 43 DDS hasta los 293 DDS. Para el hijo se realizó el cálculo de la misma forma, se obtuvo eficiencias muy altas debido al aporte de asimilados desde la planta madre, por lo tanto se asumió el valor obtenido en el último intervalo (247 a 293 DDS), como el valor constante para el período considerado de crecimiento del hijo, ya que la contribución de la madre es menor. Además, permitió determinar la cantidad de biomasa del hijo que era aportada por la madre en cada intervalo y su porcentaje de dependencia. También se calculó el RUE de la unidad de producción, suma de la fitomasa y la IPAR de la madre y el hijo en cada intervalo.

#### Tasa de asimilación neta, curva de dilución e índice de nutrición de nitrógeno

La tasa de asimilación neta, incremento del peso de la planta por unidad de área foliar en el tiempo, se calculó como una función de la tasa de crecimiento absoluto diaria dividida por el índice de área foliar diario.

Para la planta madre se calculó la curva de dilución, relación entre la concentración de nitrógeno orgánico y la fitomasa de la planta, se empleó como base la ecuación de Greenwood *et al.*, (1990) de las plantas C3 ( $\%N_{\text{crítico}} = 5,7W^{-0,5}$ ), que se muestra en la figura II-11.

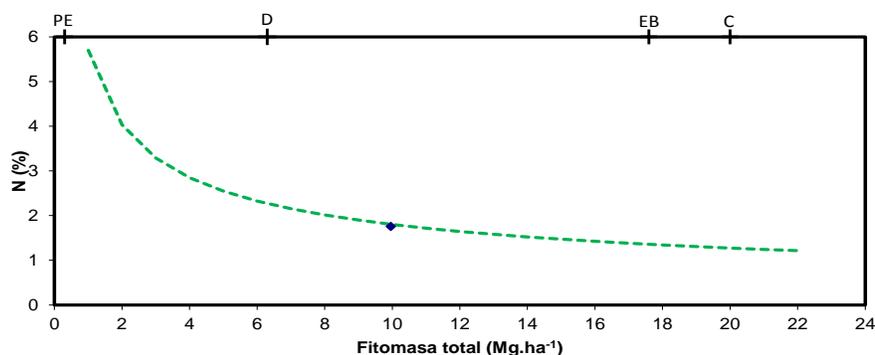


Figura II-11. Curva de dilución de Greenwood *et al.*, (1990) y se indica un ejemplo de un punto de concentración de nitrógeno. PE: preemergencia; D: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; C: cosecha.

El índice de nutrición de nitrógeno (INN) estima la condición nutritiva del cultivo con respecto a este nutriente, cuando toma el valor de uno se considera que no hay déficit ni exceso, cuando es inferior a uno se considera que hay déficit y cuando es mayor de 1 se considera que hay exceso, se calcula por la siguiente ecuación:

$$INN = CN / CNc$$

Dónde: CN es la concentración de nitrógeno medida en el cultivo y CNc es la concentración de nitrógeno crítica dada por la curva de dilución de Greenwood *et al.* (1990), se define como la concentración de nitrógeno que permite la máxima tasa de crecimiento.

Para cada intervalo de muestreo, se calculó el INN en base a la CN de la planta dividido por el CNc calculado en la curva de dilución.

### II.3. Balance hídrico

#### II.3.1. Esquema para el cálculo de balance hídrico

Las variables medidas en el balance hídrico del agroecosistema plátano durante el período del desarrollo del cultivo fueron: precipitación total, precipitación neta (goteo+caída directa + flujo caulinar), escorrentía superficial, contenido de humedad del suelo y el drenaje. Las variables que fueron estimadas fueron: evapotranspiración, interceptación del dosel e infiltración de agua en el suelo. Todos estos procesos se ilustran en la figura II-12.

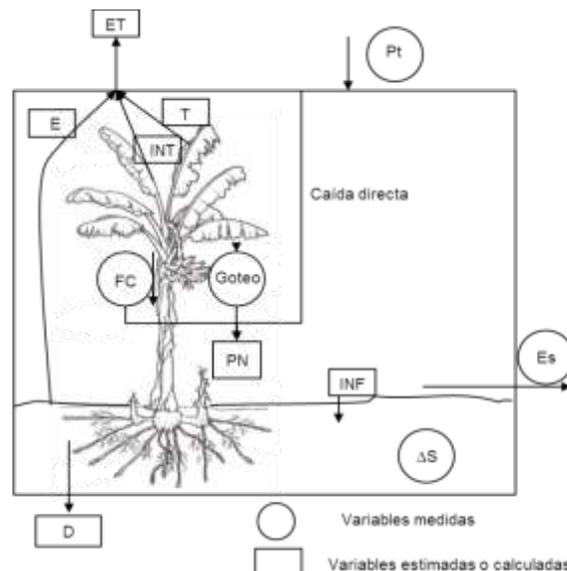


Figura II-12. Esquema del balance hídrico que fue considerado para el agroecosistema plátano. Variables medidas o estimadas: precipitación (Pt), precipitación neta (PN), goteo (en este caso incluyo la caída directa), flujo caulinar (FC), escorrentía (Es), variación del contenido de agua en el suelo ( $\Delta S$ ), infiltración (INF), transpiración (T), interceptación (INT), evaporación (E), evapotranspiración (ET) y drenaje (D).

## Plano de ubicación de equipos de medición en las parcelas

En la figura II-13, se muestra la ubicación de la estación climática automática, los pluviómetros para recolectar las muestras de agua de la precipitación total, los pluviómetros para la medición de la fracción de la precipitación neta que llega por goteo+caída directa, el flujo caulinar, el lisímetro para la medición del drenaje vertical y la parcela de erosión para la medición del drenaje superficial y sedimentos en cada una de las tres parcelas experimentales; adicionalmente, se muestran las áreas utilizadas para medir la volatilización de nitrógeno.

### II.3.2. Entrada de agua

#### Precipitación total

La entrada de agua total por precipitación se obtuvo directamente de los datos de la estación automática como se indicó en la sección II.1.3. (figura II-13), realizando descargas mensuales de los datos del data logger a una computadora portátil.

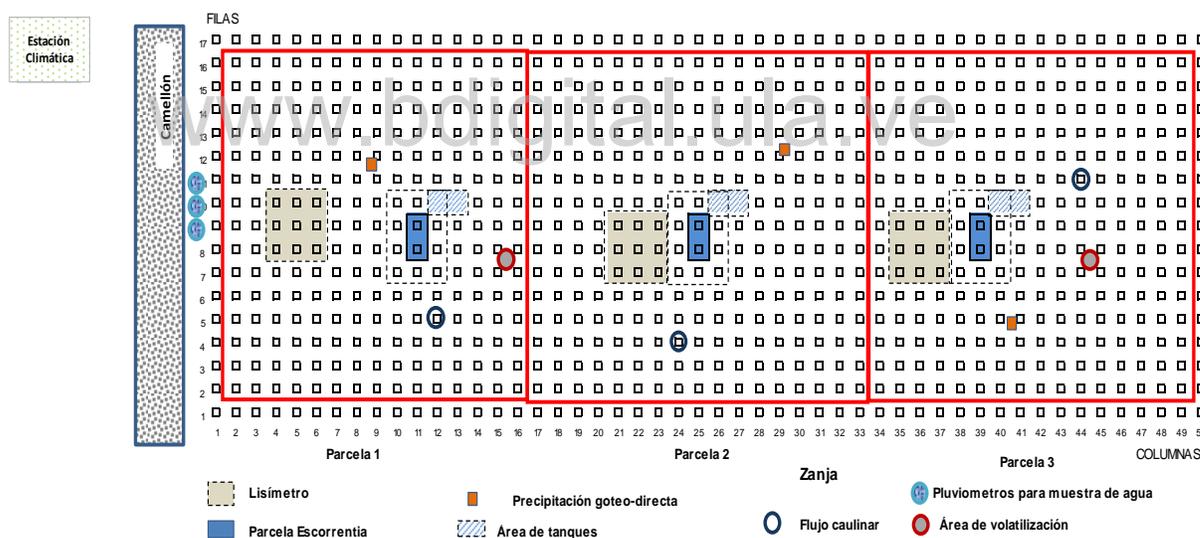


Figura II-13. Ubicación de las parcelas (cuadros con línea roja) y ubicación de los dispositivos de drenaje, las parcelas de erosión y área de almacenamiento de agua. Los cuadros pequeños representan cada planta establecida.

### II.3.3. Transferencias y almacenamiento de agua

#### Precipitación neta por goteo y directa

Para la precipitación neta que llega al suelo por goteo desde las superficies vegetales o directamente sin tocar la vegetación, se utilizó la metodología propuesta por Cattán *et al.* (2007a), que consiste en dividir el área efectiva debajo de la planta en cuatro cuadrantes de 1,25 x 1,25 m,

donde el centro de los cuadrantes es la base de la planta. En uno de los cuadrantes se estableció una matriz de 24 cuadros de 25 x 25 cm, en cada uno de los cuadros se instaló un pluviómetro con área de captación de 86,59 cm<sup>2</sup>. Estos pluviómetros artesanales fueron fabricados con botellas plásticas de politereftalato de etileno (PET) de dos litros de capacidad, este material no contiene N y por lo tanto no es una fuente de contaminación para el agua recolectada. Las botellas fueron conectadas directamente a un embudo de polietileno de 10,5 cm de diámetro (Figura II-14). Este dispositivo de muestreo, que se fijó con una retícula de madera, fue instalado permanentemente en tres plantas con similares características (altura y número de hojas), a razón de una planta por parcela de muestreo. La recolección de las muestras fue entre una a dos horas después del evento de lluvia cuando ocurrieron de día y a las 8 de la mañana cuando ocurrieron de noche, de esta forma se minimiza la posibilidad de contaminación del agua por animales. El volumen de agua captado en cada pluviómetro fue extrapolado a 1 metro cuadrado para efectuar un análisis de variograma y una interpolación de Kring, con el programa GS+ Geostatistics, para la determinación de la distribución espacial del goteo+caída directa y también se obtuvo el volumen total por cuadrante al sumar los volúmenes parciales de los 24 pluviómetros y llevarlos a 1 metro cuadrado.

El volumen total obtenido en el cuadrante se multiplicó por cuatro, para estimar la precipitación por goteo y directa de una planta. El promedio de las tres plantas medidas permitió determinar la precipitación por goteo-directa (goteo+caída directa) que ocurre en la plantación en un determinado intervalo de tiempo.

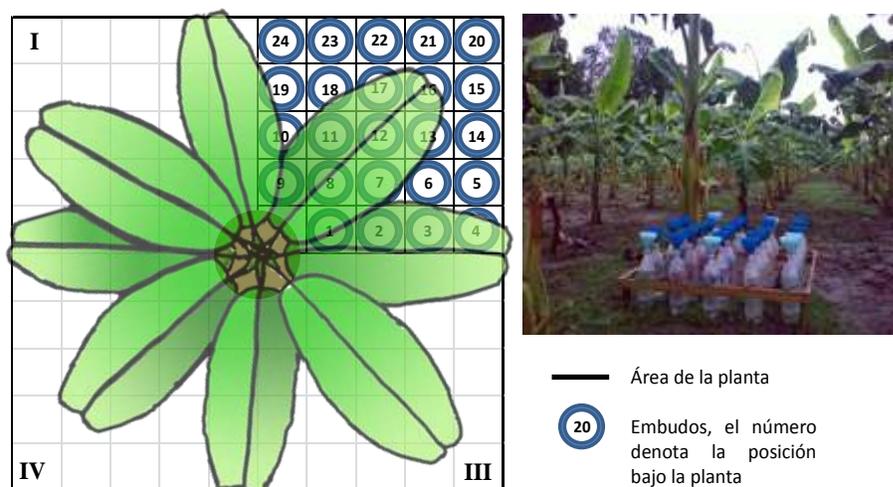


Figura II-14. Distribución espacial de los recipientes plásticos para medir la precipitación por goteo+caída directa en el área correspondiente a una planta y fotografía que muestra el dispositivo utilizado.

### Flujo caulinar

El flujo caulinar se midió utilizando un dispositivo construido con una manguera de polietileno adherida al seudotallo con silicón y palillos plásticos, conectada a un recipiente plástico de polietileno de alta densidad de 60 litros (figura II-15). Debido al engrosamiento del seudotallo este dispositivo tuvo que ser reinstalado todos los meses, para evitar el estrangulamiento de las plantas. Mensualmente fueron seleccionadas tres plantas con características similares a las plantas seleccionadas para la precipitación neta. Debido a la naturaleza de las plantas (diámetro y fragilidad del seudotallo) en sus primeros estadios hasta las 14 hojas (M4) y por problema técnicos (adherencia de la manguera al seudotallo) no fue posible medir este proceso en los primeros tres muestreos. El cálculo del flujo caulinar ( $F_c$ ) por metro cuadrado se realizó dividiendo el volumen total medido por planta por la densidad de siembra ( $5,06 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ ).



Figura II-15. Dispositivo para medir el flujo caulinar en el cultivo de plátano Hartón (*Musa AAB*).

### Precipitación neta, proceso de intercepción e infiltración

La precipitación neta (PN), representa fracción de la precipitación total que llega al suelo, la misma se determinó por la ecuación:

$$PN = \text{Goteo} + \text{caída directa} + F_c.$$

El agua interceptada (INT) por el dosel se calculó por diferencia como sigue:

$$INT = P_t - PN$$

La infiltración (INF) del agua en el suelo se calculó a partir la precipitación neta y la escorrentía superficial (Es) por la ecuación:

$$INF = PN - E_s$$

### Agua almacenada en el suelo (S)

El contenido de humedad del suelo (CRH%) se estimó por el método gravimétrico en cada muestreo destructivo para fitomasa, como se indica en la sección II.4.2. El agua almacenada, en litros.m<sup>-2</sup> o mm de agua en cada capa, se determinó con la ecuación:

$$S = (CRH\% * Da)/100 * Vol. Suelo$$

Dónde: Da es la densidad aparente en las dos capas de suelo correspondientes y Vol. Suelo es el volumen de suelo en cada capa (cm<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>) (Sarmiento y Acevedo 1991).

La variación del agua almacenada se calculó por diferencia entre los muestreos del intervalo considerado.

### II.3.4. Salidas de agua

#### Escorrentía superficial

La determinación del flujo de escorrentía superficial (Es) se realizó en parcelas de erosión cuyo diseño fue adaptado de Acevedo y Sarmiento (1990) y Sánchez *et al.*(2002). Las dimensiones de cada parcela fueron de 4,50 x 2,25 m, con un área efectiva de 10 m<sup>2</sup> que incluye dos plantas. Como la pendiente del área experimental es muy leve, de 1%, no hubo que corregir el área total a área horizontal (Figura II-13). Estas parcelas fueron delimitadas por tres lados con láminas de zinc de 0,45 m de ancho enterradas 0,15 m y sobresaliendo 0,30 m, para evitar la entrada de agua por escorrentía superficial del exterior. En la parte frontal de cada parcela, se colocó una canaleta de tubo PVC de 2,25 m por 0,20 m de ancho que transportó el agua hasta un tanque plástico de 120 litros y de éste pasa a otro tanque de 900 litros. Debido a la profundidad de los tanques, la extracción del agua se efectuó con una bomba de agua eléctrica de 1/2 HP, con sus respectivas conexiones y planta eléctrica a gasolina de 900 amperios. La canaleta colectora fue tapada con un techo plástico movable, para evitar la entrada directa de lluvia. Se estableció una parcela de erosión en cada parcela experimental (figura II-16). El procedimiento de preparación de muestras de sedimento se efectuó recolectando el sedimento grueso que se había depositado en el fondo de los tanques de recolección, llevado al laboratorio en la Estación Local Chama, donde se filtraba en un colador plástico al que se le colocaba un cuadro de tela de franela (100% algodón de 400 g.m<sup>-2</sup>), que era pesado previamente, colocado a secar al aire por 15 días dentro del laboratorio y pesado nuevamente para determinar la cantidad de sedimentos. Los sedimentos finos y las muestras de agua se obtenían de una muestra de 2 litros de agua tomada de los tanques de almacenamiento, la cual se agitaba en el laboratorio y se tomaba una muestra de 500 ml, que era

filtrada con papel de filtro libre de nitrógeno (Double ring 203) pesado previamente, obteniendo en el papel los sedimentos finos que eran secados al aire y pesados nuevamente para determinar la cantidad de sedimentos y el agua era refrigerada a 4 °C para posterior determinación de nitrógeno.

#### Drenaje

Para la determinación del drenaje se instalaron lisímetros abiertos a 50 cm de profundidad del suelo, adaptando las metodologías de Cattán *et al.* (2007a,b), Sansoulet *et al.* (2007) y Londoño *et al.* (2007).

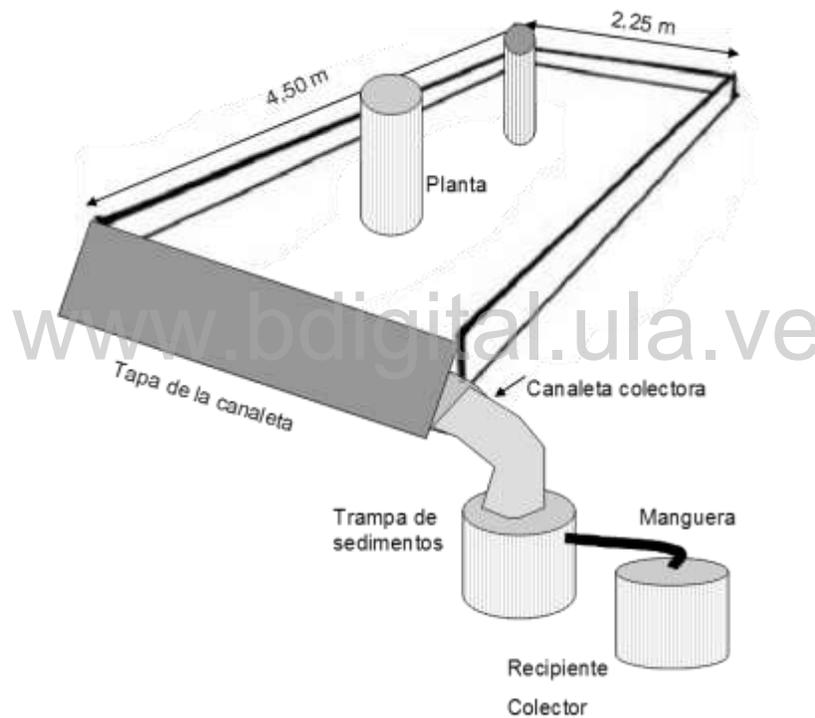


Figura II-16. Esquema de la parcela de esorrentía.

Los lisímetros son bandejas de 0,55 x 0,55 y 0,05 m de alto construidos con láminas de hierro galvanizado, con pendiente dirigida a un orificio en el centro, al cual se le conectó una manguera de 0,01 m de diámetro que termina en un envase plástico de 4 litros. Los lisímetros se instalaron por medio de calicatas laterales (1,50 x 0,55 x 1,00 m) a la ubicación de las plantas. La bandeja fue ajustada a la posición deseada con la ayuda de gatos hidráulicos y fijada posteriormente con patas telescópicas que permitían adaptarse a la altura del túnel; éste

procedimiento permite hacer buen contacto entre el techo del túnel y la arena en la bandeja. Toda esta instalación debe hacerse con sumo cuidado de no perturbar el suelo del área de crecimiento del sistema radicular de las plantas y conservar las características físicas del suelo, para que el movimiento del agua no sea modificado (figura II-17). Las bandejas se llenaron con dos capas de granito lavado de dos tamaños (0,7 y 0,4 mm aproximadamente) y una capa de arena fina lavada con la finalidad de generar un continuo en el flujo de agua y evitar tensión cero (figura II-18).

Se colocaron cuatro lisímetros abiertos en cada parcela bajo el área correspondiente a una planta. La ubicación de los mismos se realizó de tal forma que permitiera la instalación con la menor perturbación del área de la planta y que el área de captación de los cuatro lisímetros represente un cuarto del área ocupada por la planta como se muestra en la figura II-17. La figura II-19, muestra parte del proceso de instalación de los lisímetros.

La observación se realizó cada dos días o después de cada evento de lluvia. Obteniendo información sobre el volumen semanal y mensual drenado. Al sumar los volúmenes drenados por los cuatro lisímetros se obtiene el drenaje de un cuarto del área de la planta, el drenaje total de una planta se estima al multiplicar por cuatro el volumen medido.

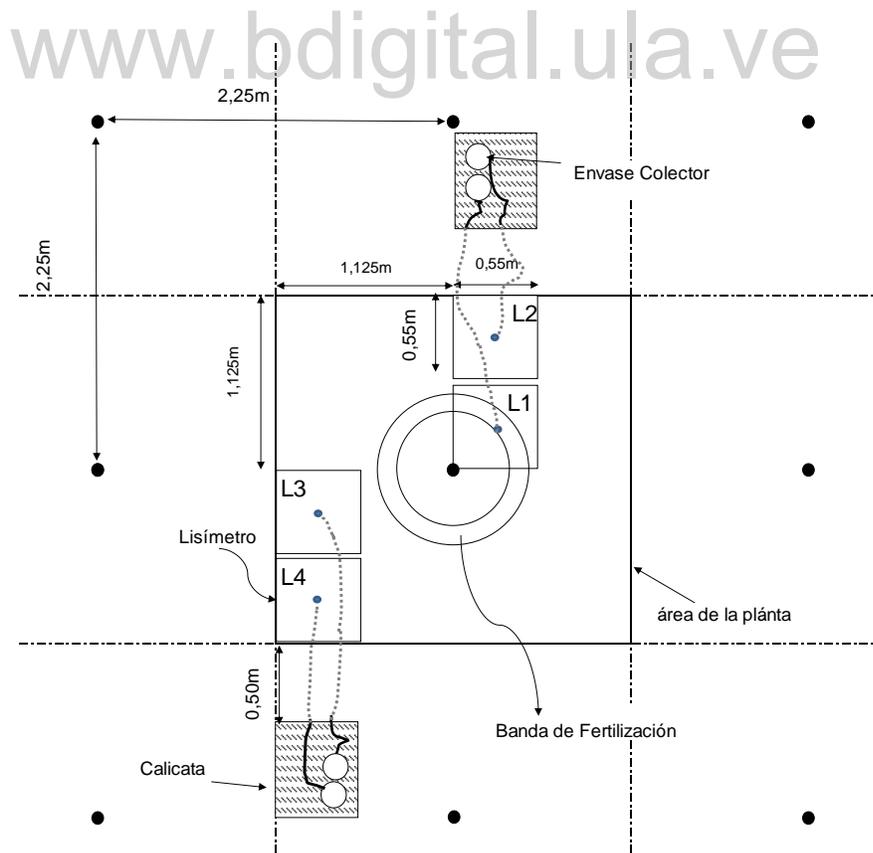


Figura II-17. Disposición de los lisímetros en la parcela. Los puntos negros indican las plantas

## Evapotranspiración

Las pérdidas gaseosas de agua no fueron medidas sino estimadas siguiendo el enfoque del coeficiente dual (Allen et al., 2006), que separa la transpiración de la evaporación del suelo. Los detalles serán explicados en el capítulo correspondiente al modelo de simulación. Las estimaciones diarias de la evapotranspiración del cultivo se acumularon en base al ciclo total e intervalos para los cálculos del balance hídrico.

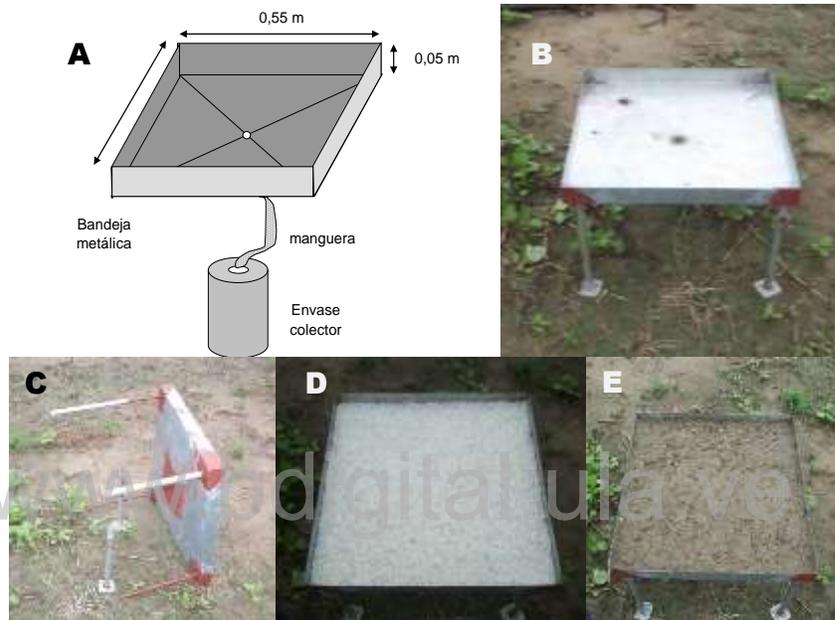


Figura II-18. Lisímetro abierto. A. Dibujo y medidas del lisímetro, B. Vista general del dispositivo, C. Detalle de patas telescópicas, D. Capa de granito fino, E. Capa de arena y borde para ajustar en el techo del túnel.

### II.3.5. Determinación de nitrógeno en los flujos de agua

En las muestras de agua colectadas por los diferentes equipos hidrológicos instalados se determinó el nitrógeno en forma mineral por destilación, utilizando un destilador automático, en el laboratorio de análisis del ICAE como se explicará más adelante. Para evaluar la cantidad de nitrógeno que pudiera haber en forma orgánica se tomaron tres muestras para cada tipo de flujo de agua, determinando en cada una el nitrógeno mineral y el nitrógeno total. De esta forma se pudo constatar que el nitrógeno en forma mineral representó el 95% del nitrógeno total en el agua de precipitación, el 82% para el goteo+caída directa, el 85% para el flujo caulinar y el 79% para la escorrentía. Estos resultados indican que la mayor parte del nitrógeno en agua está en forma mineral, por lo cual las mediciones se centraron en estas formas más fáciles de determinar.



Figura II-19. Secuencia de instalación de los lisímetros. A. Construcción de calicata inicial, B y C. vista de calicata y entrada del túnel, D. Túnel y soporte de patas del lisímetro, E. Colocación de lisímetro, F. Vista del gato para subir y ajustar el lisímetro, G. Lisímetros instalados y conectados, H. Envases colectores, I. Vista general y techo sobre la calicata, en E y G se observa el revestimiento de madera del techo y paredes del túnel.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

Determinaciones de nitrógeno en muestras de agua

La entrada de nitrógeno por precipitación total, se obtuvo de muestras de lluvia colectadas en tres pluviómetros artesanales que se instalaron a un lado de la parcela (figura II-13). Los pluviómetros se construyeron con embudos de polietileno colocados dentro de tubos de PVC, instalados a 2 m de altura y conectados directamente a recipientes colectores plásticos (PET) de dos litros. Todos los dispositivos utilizados para la medición de los flujos hídricos, contaron con una malla plástica de 0,1 mm colocada en la boca del colector, para reducir la contaminación con restos vegetales e insectos. La recolección de todas las muestras de agua se realizó entre una a dos horas después del evento de lluvia cuando ocurrieron de día y a las 8 de la mañana cuando ocurrieron de noche, lo que limita la posibilidad de contaminación por animales o microorganismos. Se contó con dos juegos de recipientes colectores, de tal forma que uno estaba colocado en campo y el otro en el laboratorio, que permitiera su lavado, a excepción de los tanques de las parcelas de escorrentía. Como los envases y demás accesorios fueron de polietileno o PET, que son químicamente inertes, resistentes al calor y al congelamiento no se efectuó un blanco de campo. Se tomó un máximo de 500 ml, por réplica, las mismas fueron filtradas con papel de filtro libre de

nitrógeno (marca Double rings 203) e inmediatamente refrigeradas a 4 °C en el laboratorio de la Estación Local Chama. Mensualmente se realizaron muestras compuestas de 1000 ml, utilizando volúmenes proporcionales a la magnitud de los eventos diarios, para obtener una muestra mensual representativa.

Cada muestra compuesta mensual fue analizada por duplicado (réplicas analíticas) tomando alícuotas de 100 ml. Se realizó una primera destilación para obtener el amonio que es pasado a amoníaco con la adición de un exceso de óxido de magnesio y luego en una segunda destilación se reducen los nitratos y nitritos a amonio por la incorporación de aleación Devarda. Las destilaciones se efectuaron en un equipo Distillation Unit K-355 Marca Buchi. El producto de cada destilación se recogió en trampas de ácido bórico al 2%, deteniendo la destilación al alcanzar un volumen destilado de 100 ml. La titulación se realizó añadiendo ácido sulfúrico 0,001 N, hasta llegar a pH 5,34 utilizando un titulador automático (Titrino 702 SM Marca Metrohm).

Los resultados, expresados en miligramos de nitrógeno por litro, se calcularon por la ecuación:

$$\text{mg N l}^{-1} = \frac{(\text{Vol. ácido} - \text{Vol. blanco}) * \text{PM N} * \text{N ácido} * 1000}{\text{Vol. alícuota}}$$

donde:

Vol. ácido= volumen del ácido sulfúrico gastado para la titulación de la muestra en ml

Vol. blanco= volumen del ácido sulfúrico gastado para la titulación del blanco en ml

N ácido= normalidad del ácido sulfúrico utilizado para la titulación en eq.l<sup>-1</sup>

PM N= peso molecular del N equivalente a 14,01 g.eq<sup>-1</sup>

Vol. alícuota= volumen de la alícuota utilizada para la destilación.

Para la determinación de nitrógeno en los flujos de goteo+caída directa, flujo caulinar, escorrentía superficial y drenaje, se siguió el mismo procedimiento realizado para la precipitación, respecto a colecta, filtrado, refrigeración, formación de muestras compuestas y análisis químico.

## II.4. Balance de nitrógeno

### II.4.1. Esquema para el cálculo de balance de nitrógeno

En esta parte se explicará la obtención de los componentes del balance del nitrógeno del agroecosistema plátano; en secciones anteriores, ya se ha descrito los procedimientos para medir el nitrógeno de la planta y el que ingresa y se moviliza por el agua, en esta parte se incluirán los métodos de medición del nitrógeno mineral que se encuentra en el suelo, la pérdida por

volatilización y en los sedimentos de escorrentía, para completar la información necesaria para la construcción del balance de nitrógeno.

En la tabla II-7 y la figura II-20, se muestran los compartimientos considerados para el cálculo del balance de nitrógeno del agroecosistema, los cuales son: las entradas por precipitación y fertilización, las salidas por volatilización, escorrentía, drenaje y cosecha de los frutos de la planta y el nitrógeno que se mantiene en el sistema.

Las determinaciones a nivel de suelo del N mineral, se realizaron en dos capas para analizar el movimiento del nitrógeno en el perfil del suelo.

#### II.4.2. Dinámica de nitrógeno en el suelo

El N mineral del suelo se determinó siguiendo las 10 etapas de crecimiento y desarrollo de la planta descrita anteriormente. Al muestrear cada planta se tomó una muestra de suelo compuesta por 20 barrenadas tomadas alrededor de la planta antes del muestreo destructivo, en cada una de las dos capas consideradas.

Tabla II-7. Resumen de los parámetros evaluados en cada compartimiento o proceso con respecto a la concentración de nitrógeno.

Compartimiento y/o procesos	Parámetro (concentración de N)
• Precipitación Total	Nmin
• Fertilización	Nmin
• Goteo+caída directa	Nmin
• Flujo caulinar	Nmin
Planta	
• Hojas	Ntotal
• Seudotallo	Ntotal
• Cormo	Ntotal
• Raíces	Ntotal
• Necromasa	Ntotal
• Hijo principal	Ntotal
• Hijos extras	Ntotal
• Racimo	Ntotal
Suelo	Nmin
N en el agua	
• Drenaje	Nmin
• Escorrentía	Nmin en agua
• Erosión	Ntotal en sedimentos

La selección de los 20 puntos de muestreo de suelo para preparar las muestras compuestas, se realizó para garantizar la representatividad de la muestra, considerando la heterogeneidad espacial debida a la forma de aplicación del fertilizante y la absorción de la planta.

Con este fin se procedió a cuadricular el área de la planta en unidades de 0,25 x 0,25 m, lo que nos representa 100 cuadrados distribuidos en cinco áreas concéntricas (Figura II-21). En cada una de estas áreas se seleccionó al azar los puntos de muestreo correspondientes a un número de submuestras que de adentro hacia fuera son 1, 3, 5, 7 y 4, respectivamente. En la última área concéntrica son menos submuestras porque está representada por mitades de los cuadros que en total representa 17 cuadros completos. Con este muestreo, la muestra compuesta resultante, constituyó un promedio insesgado del área de la planta donde cada parte del área está igualmente representada.

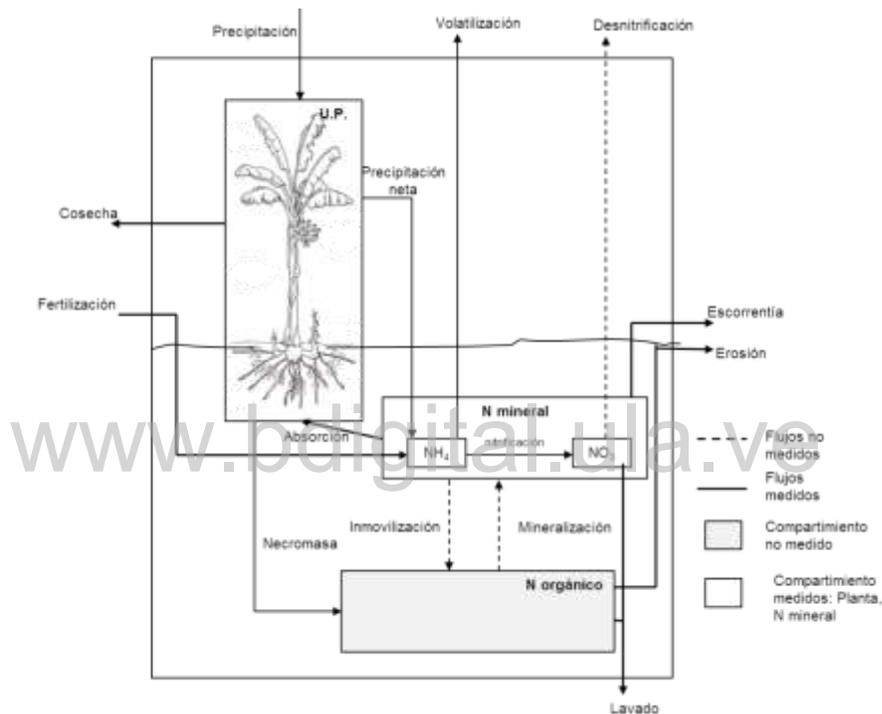


Figura II-20. Esquema de los compartimientos y flujos considerados para el cálculo del balance de nitrógeno.

La muestra compuesta de suelo de cada capa en las plantas seleccionadas se homogenizó cuidadosamente en campo y se colectó aproximadamente 1 kg, el cual se colocó en bolsas plásticas identificadas que se refrigeraron a 4 °C en el laboratorio.

La determinación del nitrógeno mineral ( $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ), se inició con la obtención del contenido relativo de humedad del suelo, por el método gravimétrico, secando 200 g de suelo húmedo a 105 °C por 24 h, con esta información se calculó la cantidad de suelo húmedo que equivaldría a 50 g de suelo seco. La extracción del N mineral, se realizó agregando 150 ml de solución extractora de  $K_2SO_4$ , 1N, al suelo que equivale a 50 g de suelo seco, luego se aplica agitación rotatoria durante 30 minutos para que el nitrógeno mineral pase a la solución y

centrifugación a 6000 rpm durante 15 minutos, para separar el suelo de la solución y obtención del extracto por filtración. En una alícuota de 80 ml del extracto se determinó por destilación el  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ , con el mismo procedimiento realizado a las muestras de agua.

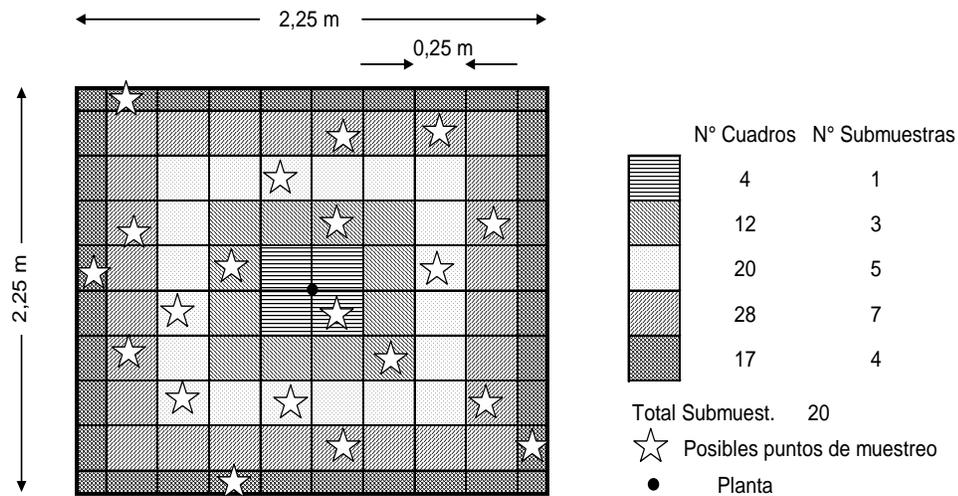


Figura II-21. Distribución de los puntos de donde se obtuvieron submuestras de suelo en el área correspondiente a una planta de plátano. Se definen cinco áreas concéntricas y en cada una se extrae un número de muestras proporcional al área, equivalente a una submuestra por cada cuatro cuadros de 0,25 x 0,25 m.

#### II.4.3. Cálculo de las pérdidas de nitrógeno por volatilización

Las pérdidas de nitrógeno por volatilización, se estimaron por el método de absorción semiabierto estático propuesto por Nommik (1973) modificado por Videla (1994) y adaptado del utilizado por Fontanetto *et al.* (2006). El mismo consiste en atrapar el amoníaco dentro de un cilindro de polietileno (trampa) de 0,15 m de diámetro interno por 0,50 m de altura (Figura II-22), que tiene en su parte superior dos discos de esponja de poliuretano de 0,03 m de espesor, que para este trabajo, fueron cortadas de un diámetro ligeramente mayor, lo que permitió obviar la estructura de sujeción, indicada en el método original, ya que la presión ejercida por los discos de esponja fue suficiente para mantenerlos en el sitio dentro del cilindro, además que reduce las pérdidas del amoníaco. Estas fueron embebidas en ácido sulfúrico 0,1 N y separadas 0,15 m de suelo y 0,15 m entre sí; las esponjas, previamente pesadas eran embebidas con 60 ml de ácido sulfúrico 0,1 N (Valery, 2010) antes de llevarlas al campo y colocadas en recipientes herméticos para evitar contaminación.

El amoníaco que se desprende del suelo es atrapado por el disco inferior, mientras que el superior evita que se contamine con amonio proveniente del exterior. Los discos se cambiaron cada 48 horas, antes de las 9 de la mañana, si no estaba lloviendo y fueron llevados al laboratorio.

Una vez en el laboratorio, las esponjas se lavaron con 250 ml de agua destilada y fueron exprimidas en cinco oportunidades para homogenizar la concentración de  $\text{NH}_4^+$  en la solución (Machado, D., comunicación personal). Una alícuota de 80 ml se tomó por cada día y el amoníaco producido se determinó por destilación, como se explicó en la determinación de nitrógeno en la precipitación.

La instalación de los cilindros fue en la banda de aplicación del fertilizante, enterrados 0,05 m en el suelo. Para mejorar la uniformidad de la aplicación de los fertilizantes alrededor de la planta y calcular la dosis por cilindro, se estableció una banda de aplicación de 0,15 m de ancho, a una distancia entre 0,4 m y 0,55 m de separación del centro de la planta, que representa  $0,448 \text{ m}^2$ . Se aplicó una dosis anual de Nitrógeno de  $200 \text{ g.planta}^{-1}$ , repartida en tres aplicaciones, correspondiendo a una dosis a 2,63 gN por trampa. Se colocaron cuatro trampas con fertilizante y cuatro trampas sin fertilizante, colocando una trampa con fertilizante por planta y una trampa sin fertilizante en la calle de la misma planta. Las trampas se colocaron en tres oportunidades sincronizadas con las aplicaciones de fertilizante.

Para evitar el problema de la lluvia que puede lavar y dañar las trampas, se colocó a cada cilindro un techo plástico. Con esta estructura se causa una alteración de las condiciones de humedad del suelo dentro del cilindro debido a que no entra la precipitación durante el período de mediciones, para subsanar este problema se midió la cantidad de agua, con pluviómetros de igual diámetro que las trampas y se agregó luego al suelo dentro del cilindro, cuando se efectuó el cambio de los discos de esponja cada 48 h (figura II-23).

El período de evaluación del amoníaco volatilizado fue desde la aplicación del fertilizante, hasta que las pérdidas de nitrógeno en las trampas con fertilizante fueron similares a las trampas sin fertilizante, lo que demoró aproximadamente 20 días. Estas baterías de trampas permitieron el cálculo del nitrógeno volatilizado desde el fertilizante aplicado y del volatilizado naturalmente por el suelo.

Para el cálculo de la volatilización desde el suelo sin fertilización se asumió que el valor obtenido en las trampas sobre suelo sin fertilizante se podía extrapolar para todo el ciclo del cultivo, calculando una pérdida promedio diaria de nitrógeno y multiplicada por la duración del ciclo y los períodos muestreados para efectos del balance de nitrógeno.

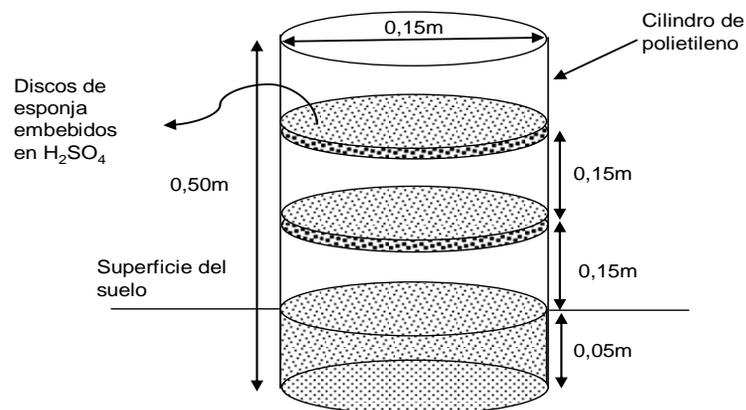


Figura II-22. Trampa para obtener el amoníaco volatilizado del fertilizante en el campo.



Figura II-23. Disposición en el campo de los cilindros trampa utilizados para la medición de la pérdida de nitrógeno por volatilización. Un juego de cilindros se instala sobre la banda de fertilización y los testigos se instalan en la calle. Obsérvense los pluviómetros para coleccionar el agua de lluvia que cada dos días se añade a los cilindros trampa.

#### II.4.4. Cálculo del nitrógeno perdido por erosión

Las muestras diarias de sedimento se homogenizaron y se mezclaron proporcionalmente al peso de los sedimentos producidos por cada evento, para formar muestras compuestas mensuales de 50 g aproximadamente, para la determinación del nitrógeno total que se efectuó por el método Kjeldahl (Bradstreet, 1965, AOAC, 1990).

#### II.4.5. Cálculo del balance de nitrógeno

El balance de nitrógeno se calculó en base a los resultados obtenidos, por medio de las diferentes entradas, salidas y transferencias dentro del agroecosistema (figura II-20). Los tres compartimientos considerados son: nitrógeno en la fitomasa de la unidad de producción (U.P.),

nitrógeno mineral del suelo y nitrógeno orgánico del suelo. El incremento en el compartimiento de nitrógeno de la U.P. se calcula como:

$$\Delta N \text{ U.P.} = N \text{ U.P.}_n - N \text{ U.P.}_{(n-1)}$$

donde:  $\Delta N \text{ U.P.}$  es la variación de la cantidad de nitrógeno en la U.P.;  $N \text{ U.P.}_n$  el nitrógeno de la unidad de producción al final del intervalo y  $N \text{ U.P.}_{(n-1)}$  el nitrógeno de la unidad de producción al inicio del intervalo.

Este compartimiento presenta entradas de nitrógeno por precipitación (Pt), absorción (Abs) y salidas por precipitación neta (PN), cosecha (Cos) y mortalidad (Nec) que permiten obtener el contenido de nitrógeno con la siguiente ecuación:

$$\Delta N \text{ U.P.} = Pt + Abs - PN - Cos - Nec$$

La ecuación anterior permite el cálculo de la absorción por despeje que es el flujo faltante.

De la misma manera, el compartimiento del nitrógeno mineral varía según la ecuación:

$$\Delta N_{\text{min}} = N_{\text{min}}_n - N_{\text{min}}_{(n-1)}$$

donde:  $\Delta N_{\text{min}}$  es la variación del nitrógeno mineral,  $N_{\text{min}}_n$  es el nitrógeno mineral al final del intervalo y  $N_{\text{min}}_{(n-1)}$  es el nitrógeno mineral al inicio del intervalo.

Como el nitrógeno mineral presenta los siguientes flujos de entrada: PN, fertilización (Fer) y mineralización (min) y salidas por Absorción (Abs), escorrentía (Es), volatilización (Vol), lavado (Lav) e inmovilización (inm), se puede también obtener por la ecuación:

$$\Delta N_{\text{min}} = PN + Fer - Abs - Es - Vol - Lav + min - inm$$

donde el flujo neto de la mineralización y la inmovilización puede considerarse como la mineralización neta (min neta = min-inm). El cálculo de la min neta se realizó por despeje de la ecuación anterior y si la mineralización neta da un valor positivo es mineralización y si da un valor negativo es inmovilización. Debido a que se presentaron problemas, los cuales se explican más adelante, para la determinación del lavado, para el dato a ser incluido en la ecuación anterior, se decidió usar el obtenido del modelo de simulación para el lavado de nitrógeno.

Con los resultados obtenidos, se presentan balances de los períodos de siembra a diferenciación floral (134 DDS), de diferenciación floral a emergencia de la bellota (219 DDS), de emergencia de la bellota a cosecha (293 DDS) y de siembra a cosecha; además, se realizó el balance de nitrógeno de todo el ciclo a nivel del suelo y del agroecosistema. También se graficó la dinámica de mineralización e inmovilización a lo largo del ciclo del cultivo.

## II.5. Manejo del cultivo

La preparación del terreno se realizó con rastra liviana, se efectuaron cuatro pases, dos meses antes de la siembra y se mantuvo limpio de malezas. Durante el mes de mayo y junio se efectuó el trazado de la plantación, selección de los lugares e instalación de las parcelas de erosión y los lisímetros.

El manejo de los cormos se realizó dos días antes de la siembra, que se efectuó el 24 de junio de 2010. Este consistió en el sacado del cormo de la planta madre, el corte del seudotallo y las raíces; terminando con desinfección por inmersión en agua con *Trichoderma* (400 g.100 l<sup>-1</sup>).

La fertilización se realizó en las fechas 28/08/2010, 18/10/2010 y 06/12/2010 (figura II-25), aplicando 200 g de N, 50 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 150 g de K<sub>2</sub>O por planta y por aplicación, que equivale a una dosis anual de 395 kgN.ha<sup>-1</sup>, 99 kgP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.ha<sup>-1</sup> y 296 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>, fraccionada en tres partes iguales (66,7 g de N, 16,7 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 50,0 g de K<sub>2</sub>O por planta). La aplicación se realizó uniformemente en una banda entre 0,40 a 0,55 m desde el centro de la planta. Las fertilizaciones fueron complementadas con microelementos utilizando: magnesio (36 kgMgO.ha<sup>-1</sup>), zinc (5 kg.ha<sup>-1</sup>), boro (1 kg.ha<sup>-1</sup>) y mensualmente se aplicó a nivel foliar los microelementos manganeso, hierro, cobre, zinc, boro, molibdeno (“fertilón combi” a razón de 1 kg.ha<sup>-1</sup>).

El combate de malezas, se realizó alternadamente entre cinco aplicaciones de herbicida (Glifosato a razón de 1 l.ha<sup>-1</sup>) y cuatro ciclos de corte mecánico con guadaña. El control de la Sigatoka Negra, se inició el 22 de octubre 2010 y se continuaron las aplicaciones terrestres hasta el 23 de febrero de 2011, en intervalos en promedio de 21 días (figura II-23), con fungicidas sistémicos (Azoxystrobin, Flusilazol, Pyrimethanil), los mismos se realizaron con motoasperjadora de espalda de 20 litros.

El deshoje se realizó siguiendo el sistema axial (madre, hijo y nieto), el cual permite mantener el número sembrado inicialmente de plantas por hectárea y se ilustra en la figura II-25. Se efectuaron tres ciclos de esta labor durante el ensayo (figura II-24).

El deshoje y cirugía, es una práctica de eliminación total o parcial de las hojas que son necrosadas por el hongo, la cual se realiza con el objetivo de reducir el inóculo de la enfermedad Sigatoka negra. Se realizó cada quince días a partir del 14 de septiembre hasta el 17 de marzo, efectuando 19 ciclos (Figura II-24). La limpieza del seudotallo se efectuó una vez al mes junto con el deshoje. Los restos vegetales producto del deshoje, seudotallo y deshoje se cortaron en trozos y distribuyeron uniformemente en toda la plantación, para acelerar su descomposición y disminuir el crecimiento de las malezas, disminuyendo los riesgos de plagas, enfermedades y la erosión.

La cosecha se realizó cuando los racimos alcanzaron una edad de 11 semanas, para determinar la edad, se encintó el racimo una vez terminado el desarrollo de las manos (entre 10 a 15 días luego de emitida la bellota), colocando una cinta plástica (mimbre) de un color diferente para cada semana.

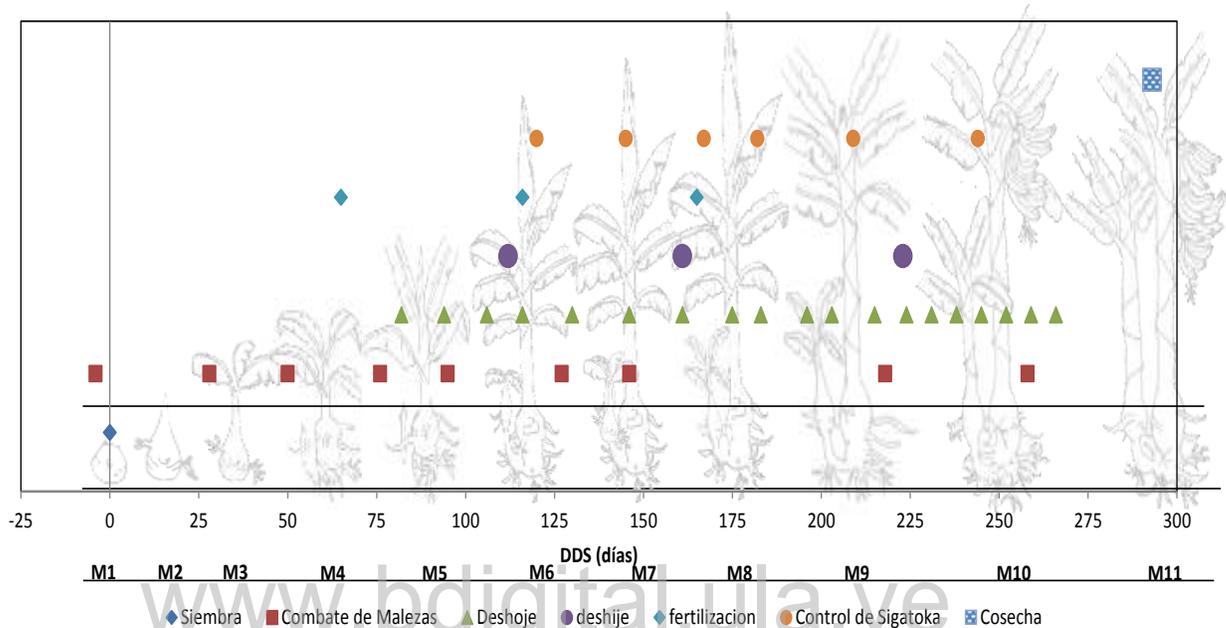


Figura II-24. Cronograma de las prácticas de manejo del cultivo experimental de plátano Hartón.

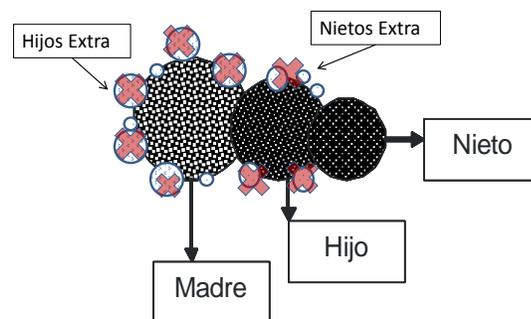


Figura II-25. Sistema de orientación de los hijos de la planta de plátano. Los círculos con la X, son los hijos y nietos que se eliminan durante el deshoje.

### **CAPÍTULO III. RESULTADOS**

En la exposición de los resultados comenzaremos analizando la dinámica de crecimiento del cultivo, haciendo énfasis en los patrones de distribución de asimilados entre los órganos y entre la planta madre, el hijo y los nietos. Luego analizaremos la dinámica de la absorción y distribución del nitrógeno entre los órganos y relaciones de eficiencia del uso de la luz. Seguidamente, se presentarán los resultados del balance hídrico, incluyendo relaciones entre la precipitación, los flujos considerados y la planta. Finalmente, se muestran los resultados del balance de nitrógeno del agroecosistema plátano que incluye la dinámica del nitrógeno en los diferentes compartimientos del sistema, esta estructura de presentación de los resultados fue inspirada por el trabajo de Machado (2005) en el cultivo de papa, donde desarrollo un enfoque similar del problema en estudio.

#### **III.1. Dinámica de la fitomasa**

El período de desarrollo de la plantación, desde la siembra a la cosecha, fue en promedio de  $293 \pm 3$  días o 9,8 meses, ajustándose a lo reportado en la zona de estudio que oscila entre 9 a 13 meses (Nava y Villarreal, 2000; Gómez *et al.*, 2004).

Se evidencian tres etapas en el ciclo productivo que hemos denominado: crecimiento vegetativo, reproductivo y productivo. La etapa de crecimiento vegetativo tiene una duración de aproximadamente 98 días entre la siembra (0 DDS) hasta los 98 DDS; la etapa reproductiva transcurre desde los 98 hasta los 219 DDS (121 días) y la etapa productiva tuvo lugar entre los 219 y los 293 DDS (74 días).

Dentro de la etapa de crecimiento vegetativo puede distinguirse una primera fase de establecimiento que se prolonga durante los primeros 28 DDS y se caracteriza por un crecimiento lento, donde la planta depende exclusivamente de las reservas del cormo para el desarrollo de todas las estructuras tanto aéreas como subterráneas. Esta fase incluye la siembra, la preemergencia y hasta la aparición de la hoja 13. A partir de allí comienza una fase de crecimiento vegetativo durante la cual se produce un crecimiento acelerado de todas las estructuras de la planta, con los mayores crecimientos de los órganos aéreos: el seudotallo y las hojas; los cuales alcanzan los valores máximos de biomasa cerca de la emergencia de la inflorescencia o bellota. Alrededor de los 134 DDS (hoja 19) ocurre la diferenciación del meristema foliar en meristema floral que da inicio a la formación interna de la bellota y se produce el paso a la etapa

reproductiva, la cual finaliza cuando emerge la bellota en el ápice delseudotallo, momento que coincide con un período de estabilización de la biomasa de las raíces.

En la etapa productiva se experimenta un decrecimiento de todos los compartimientos aéreos y subterráneos a excepción del racimo, intensificándose un fuerte proceso de retranslocación desde elseudotallo, hojas y corno para el llenado del racimo.

La fitomasa de la planta madre (tabla III-1 y figura III-1) a lo largo de la etapa de crecimiento vegetativo decrece levemente entre la siembra y la preemergencia, aumenta lentamente entre la preemergencia y la hoja 7 (57 DDS) y luego aumenta exponencialmente en la fase de crecimiento vegetativo hasta la diferenciación del meristema foliar a floral, que ocurrió casi a la mitad del ciclo de producción de la planta, en pleno crecimiento. La etapa reproductiva continúa desde la diferenciación del meristema floral hasta la emergencia de la inflorescencia, con un aumento lineal de la biomasa, es decir un crecimiento constante, que se manifiesta en la pendiente estable de la curva. Luego viene la etapa productiva, correspondiente a las fases de floración y llenado del racimo, con una reducción en la pendiente de la curva hasta la cosecha, debido a la disminución del área foliar y retranslocación de asimilados desde elseudotallo, las hojas y el corno hacia el racimo y el hijo. Este comportamiento que describe la planta madre se ajusta a una curva sigmoidea típica de crecimiento vegetal de las plantas C3.

Tabla III-1. Etapas y fases de crecimiento, estados fenológicos, períodos de evaluación y total de fitomasa de la unidad de producción.

Etapas crecimiento	Fases	Estado Fenológico (madre)	DDS	Muestreo	Total Fitomasa (g.m <sup>-2</sup> )			
					Unidad Prod.	Madre	Hijo	Nieto
Crecimiento vegetativo	Establecimiento	Siembra	0	1	32,43	32,43		
		Preemergencia	28	2	30,94	30,90	0,04	
		Hoja 3	43	3	32,09	32,03	0,06	
		Hoja 7	57	4	43,18	43,12	0,07	
		Hoja 13	98	5	159,33	157,63	1,69	
		C. vegetativo	Hoja 19 (DF.)	134	6	539,21	533,75	5,46
Reproductivo		Hoja 25	157	7	915,49	871,49	43,88	0,12
		Hoja 31	198	8	1423,58	1294,06	129,17	0,35
		EB	219	9	1685,84	1528,07	156,32	1,45
Productivo	Floración y llenado	28 DEB	247	10	1862,99	1552,82	308,46	1,71
		Cosecha	293	11	2538,43	1998,78	537,43	2,22

DDS: días después de la siembra; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota.

Se evidenció que el hijo inició su crecimiento a partir de los 28 DDS (Tabla III-1, figura III-2), cuando se observaron las yemas en el corno madre, momento que se asume como el inicio de la formación del corno del hijo, que presentó un crecimiento lento durante alrededor de 113 días y

continuó con un crecimiento acelerado de su biomasa hasta llegar la planta madre a la hoja 25 (157 DDS), cuando se observaron las primeras hojas y la presencia de yemas de los nietos.

La unidad de producción, como se observa en la tabla III-1, sigue el mismo comportamiento de la planta madre y se va diferenciando de ésta en la medida que el hijo se desarrolla, siguiendo el comportamiento clásico de la curva sigmoidea de crecimiento vegetal.

### III.1.1. Compartimientos de fitomasa de la planta madre

En la tabla III-2 y figura III-1, se muestran los resultados obtenidos para la fitomasa de los compartimientos de la planta madre, expresados en gramos por metro cuadrado.

Tabla III-2. Fitomasa promedio de la planta madre por compartimiento (gMS.m<sup>-2</sup>) en los distintos estados fenológicos. Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas (p<0,05) entre los estados fenológicos. n=3 plantas para S, PE y H3 y n=6 para el resto.

Compart.	DDS	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	C
		0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293
		<b>32,43</b>	<b>27,71</b>	<b>20,01</b>	<b>19,44</b>	<b>36,03</b>	<b>61,17</b>	<b>105,52</b>	<b>149,22</b>	<b>166,81</b>	<b>166,88</b>	<b>109,76</b>
Cormo		11,70	12,81	9,87	7,87	7,42	32,91	19,40	18,36	32,79	23,14	11,14
		d	d	d	d	d	c	b	a	a	a	b
		<b>1,60</b>	<b>2,69</b>	<b>3,25</b>	<b>49,65</b>	<b>147,99</b>	<b>237,08</b>	<b>240,82</b>	<b>234,06</b>	<b>197,69</b>	<b>131,81</b>	
Raíces		0,52	2,21	2,50	7,18	35,60	40,70	62,03	36,80	19,13	21,66	
		d	d	d	c	b	a	a	a	a	b	
		<b>1,30</b>	<b>4,29</b>	<b>9,33</b>	<b>27,79</b>	<b>133,81</b>	<b>226,30</b>	<b>455,73</b>	<b>650,61</b>	<b>498,81</b>	<b>308,65</b>	
Seudotallo		0,23	2,41	5,50	7,44	46,94	58,62	84,06	105,15	97,82	31,66	
		f	f	f	f	e	d	b	a	b	c	
		<b>0,09</b>	<b>4,84</b>	<b>10,98</b>	<b>38,02</b>	<b>132,84</b>	<b>185,52</b>	<b>326,27</b>	<b>290,14</b>	<b>232,85</b>	<b>100,36</b>	
Hojas		0,05	2,38	4,77	9,56	42,73	27,97	33,84	37,63	17,83	27,45	
		g	fg	fg	f	e	d	a	b	c	e	
									<b>23,33</b>	<b>288,64</b>	<b>723,56</b>	
Racimo									2,43	58,80	98,06	
									c	b	a	
		<b>0,20</b>	<b>0,21</b>	<b>0,12</b>	<b>6,15</b>	<b>57,93</b>	<b>117,07</b>	<b>122,03</b>	<b>163,12</b>	<b>167,95</b>	<b>162,90</b>	
Cormos hijos extra		0,10	0,13	0,09	4,28	35,93	55,41	49,63	29,73	72,99	62,22	
		c	c	c	c	cb	ab	ab	a	a	a	
					<b>8,26</b>	<b>91,58</b>	<b>124,53</b>	<b>204,83</b>	<b>227,06</b>	<b>342,64</b>	<b>461,72</b>	
Necromasa aérea					1,54	21,65	42,32	59,64	55,14	66,55	135,49	
					c	b	b	ab	ab	a	a	

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

El cormo, al inicio de la fase de establecimiento, presenta una disminución de su materia seca debido a la translocación inicial de biomasa hacia la formación de las nuevas estructuras, principalmente para la formación de raíces,seudotallo y hojas hasta la hoja 7 (57 DDS). Entre la siembra y la preemergencia, el cormo disminuyó su peso en 13,9% que se distribuyó en 33,8% en

respiración (disminución de peso total de la planta madre) y el restante 66,2% en la formación de órganos aéreos y subterráneos. En los días siguientes comienza la formación de un nuevo cormo hasta un máximo durante la fase de floración (sección exponencial de la curva) 21 días después de la emergencia de la bellota, para disminuir nuevamente durante el llenado del racimo.

Con respecto a las raíces, presentan igualmente un crecimiento lento en la primera fase de establecimiento pero después de la hoja 7 el crecimiento se acelera exponencialmente hasta 98 DDS, cuando presenta un crecimiento constante hasta 60 días después de la diferenciación (aproximadamente a la aparición de hoja 31), donde comienza a estabilizarse la fitomasa en sus máximos valores hasta la fase de llenado del racimo, período en el cual cesa la producción de raíces de la madre y luego se inicia la reducción que continua hasta la cosecha. Entre la siembra y la preemergencia (28 DDS) se observa que el 35,4% de los asimilados retranslocados del cormo se invirtieron en las raíces.

La biomasa delseudotallo en la fase de establecimiento mostró un crecimiento lento, seguido por un crecimiento exponencial durante la etapa de crecimiento vegetativo, alcanzando el máximo de biomasa pocos días después de la emergencia de la bellota (219 DDS), para seguidamente experimentar una rápida disminución de la biomasa desde la etapa de floración-fructificación hasta la cosecha, debido al proceso de retranslocación. A este órgano de sostén, en los primeros 28 DDS, le son asignados el 28,7% de los asimilados retranslocados desde el cormo.

La biomasa de los hijos extra (tabla III-2), muestra un comportamiento constante durante los primeros 134 DDS, período donde la planta madre ejerce un fuerte control sobre su crecimiento. Alrededor de este momento (134 DDS) se rompe la dominancia apical fomentando la reproducción vegetativa, con un rápido crecimiento hasta la emergencia de la bellota para aumentar de tamaño y permanecer nuevamente constante hasta la cosecha.

Es importante señalar que esta forma particular de crecimiento del compartimiento de los hijos extra puede deberse a la práctica del deshije que limita el crecimiento, por lo tanto la planta madre invierte asimilados para su crecimiento y mantenimiento debido a la falta de hojas durante la mayor parte del ciclo. Además, como la biomasa de este compartimiento puede ser mayor o similar al cormo de la planta madre, su función en la unidad de producción debe ser determinada ya que el objetivo de reproducción para este compartimiento se ha desechado, pero existe la posibilidad de que puedan constituir estructuras de almacenaje o de anclaje, de lo contrario la práctica de deshije debe ser mejorada.

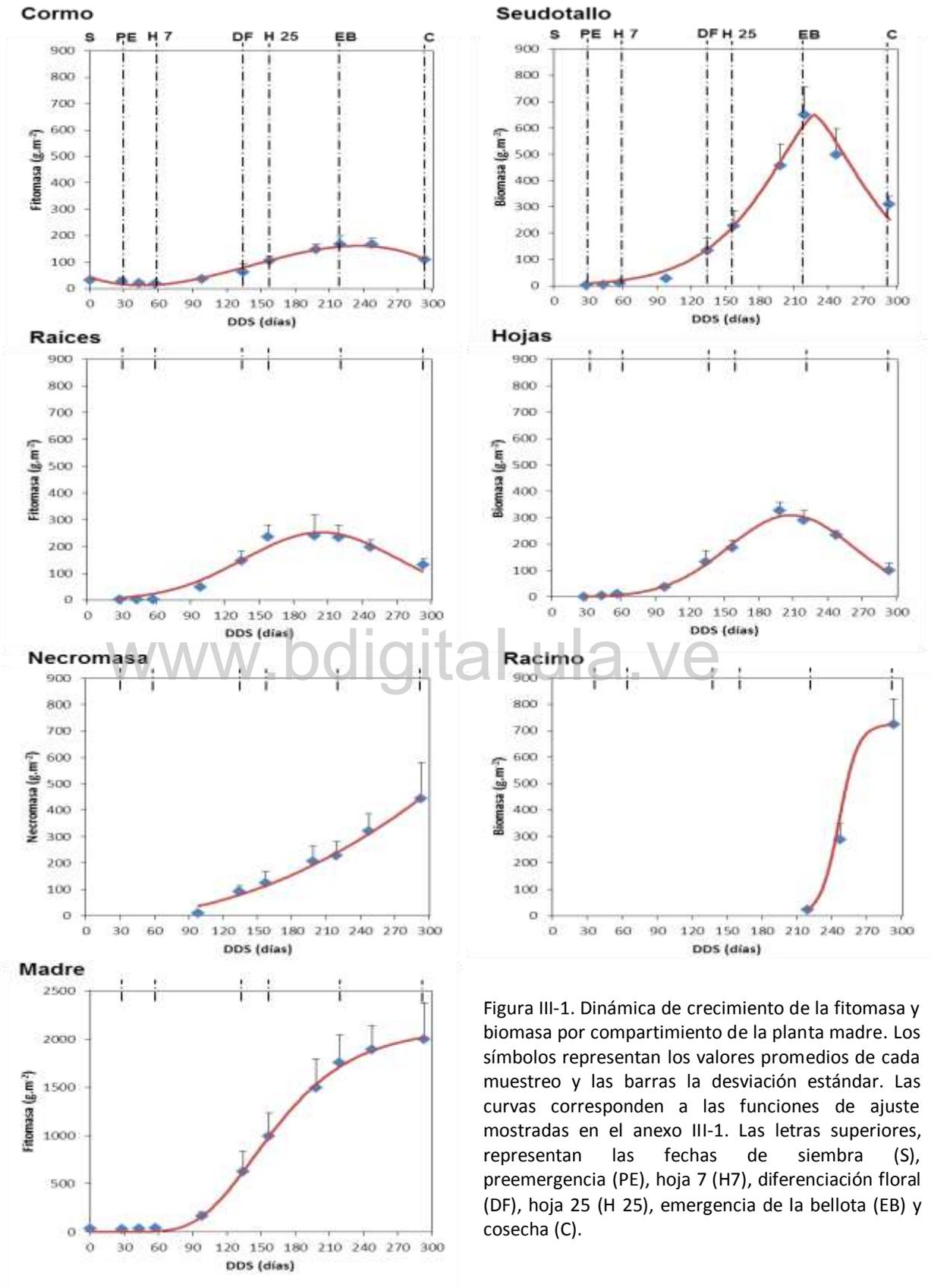


Figura III-1. Dinámica de crecimiento de la fitomasa y biomasa por compartimento de la planta madre. Los símbolos representan los valores promedio de cada muestreo y las barras la desviación estándar. Las curvas corresponden a las funciones de ajuste mostradas en el anexo III-1. Las letras superiores, representan las fechas de siembra (S), preemergencia (PE), hoja 7 (H7), diferenciación floral (DF), hoja 25 (H 25), emergencia de la bellota (EB) y cosecha (C).

Con respecto al crecimiento de las hojas, se observa que la planta durante la fase de establecimiento después de la preemergencia, efectúa una fuerte inversión en este compartimiento; el crecimiento exponencial de la biomasa foliar termina a los 198 DDS, 23 días antes de la emergencia de la bellota, cuando se alcanza el máximo valor de biomasa para luego disminuir 2/3 al momento de la cosecha por procesos de retranslocación y deshoje (tabla III-2, figura III-1). En los primeros 28 DDS, este órgano recibe el 2,1% de los asimilados retranslocados del cormo.

El crecimiento de las estructuras reproductivas es lento durante el período que transcurre dentro delseudotallo, pero al emerger la bellota y luego de la floración se inicia un crecimiento exponencial muy acelerado que no es experimentado por ninguno de los órganos de la planta, gracias a que no solamente depende de la asimilación fotosintética sino también de los asimilados retranslocados de los órganos aéreos y subterráneos, presentando una tasa de crecimiento de aproximadamente 10 gMS.día<sup>-1</sup>. En la tabla III-3, se presentan los compartimientos del racimo observándose que a partir de los 28 DEB, los compartimientos del raquis y la necromasa de las estructuras florales (Brácteas y Flores) no presentan diferencias significativas en el tiempo y los dedos representan el compartimiento que aumenta significativamente de tamaño, lo que indica que en la primera fase después de la emergencia de la bellota se forman completamente las estructuras de sostén y aproximadamente una tercera parte del llenado de los dedos del racimo. El peso fresco promedio del racimo alcanzó un valor de 13,5 ± 1,6 kg.planta<sup>-1</sup> y una producción de 21,7 Mg.ha<sup>-1</sup>.

Compart.	DDS	EB	28DEB	C
		219	247	293
Inflorescencia (bellota)		<b>23,33</b>		
		2,43		
Raquis		<b>22,25</b>	<b>16,05</b>	
		4,57	1,96	
		a	a	
Dedos		<b>266,39</b>	<b>707,51</b>	
		54,23	96,10	
		b	a	
Necromasa estructuras florales		<b>21,52</b>	<b>18,39</b>	
		2,00	4,93	
		a	a	

Tabla III-3. Biomasa del racimo de la planta madre por compartimiento (gMS.m<sup>-2</sup>). Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas a p<0,05. DDS: días después de la siembra; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

Por su parte, la necromasa, presenta una dinámica asociada al momento de inicio de las prácticas de deshoje y deshije con un continuo aumento durante todo el ciclo de la planta madre; aquí se debe recordar que la necromasa mostrada en la tabla III-4, fue recolectada a lo largo del ciclo de desarrollo para las plantas seleccionadas para ser muestreadas en los ciclos de deshoje y deshije, para el resto de plantas se siguió el manejo agronómico de este material que después de cortado fue dejado esparcido sobre suelo. En la tabla III-4, se observa en detalle los compartimientos de la necromasa aérea, donde se observa que el flujo de necromasa que aporta la actividad del deshoje representa el 91% y el deshije el 9%, la necromasa de hojas aporta el 83,8% del total de la necromasa aérea, lo que hace evidente que la práctica de manejo para el control de la Sigatoka Negra, limita por un lado la asimilación fotosintética y por otra parte el flujo de retranslocación de las hojas para el llenado del racimo, ya que la disminución del compartimiento es producto del manejo y no de la senescencia natural de las estructuras foliares. También se observa que la necromasa proveniente del seudotallo y de la extracción o corte de los hijos extra aumenta progresivamente a lo largo del ciclo; sin embargo, la necromasa de hoja luego de la emergencia de la bellota incrementa a una tasa mayor producto de la combinación de la senescencia de las hojas y el deshoje.

www.bdigital.ula.ve

Tabla III-4. Necromasa aérea acumulada de la planta madre por compartimiento (gMS.m<sup>-2</sup>). Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre muestreos a p<0,05.

Compart.	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	C
DDS.	0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293
					<b>7,77</b>	<b>72,73</b>	<b>102,92</b>	<b>153,40</b>	<b>170,67</b>	<b>264,47</b>	<b>371,78</b>
Hojas					1,42	13,49	27,44	38,51	37,16	43,20	117,29
					f	e	ed	dc	c	b	a
					<b>0,49</b>	<b>8,02</b>	<b>18,35</b>	<b>22,94</b>	<b>30,28</b>	<b>23,65</b>	<b>31,23</b>
Seudotallo (vainas)					0,11	3,38	12,44	8,43	4,20	8,58	8,49
					c	c	b	ab	ab	a	a
Hijos Extra (hojas y seudotallo)					<b>10,82</b>	<b>3,26</b>	<b>28,49</b>	<b>26,11</b>	<b>33,00</b>	<b>40,33</b>	
					4,77	2,43	12,70	13,77	12,76	4,77	
					c	c	ab	b	ab	a	

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

### III.1.2. Compartimientos de la planta Hijo

En la tabla III-5 y la figura III-2, se muestran los valores obtenidos para el crecimiento de los compartimientos del hijo y las curvas de su dinámica en función de los días después de la siembra.

El cormo del hijo inicia su desarrollo precozmente debido a que es un proceso que no se detiene al momento del corte de las estructuras aéreas y raíces de la planta madre en la preparación del cormo para la siembra, luego de la preemergencia la planta madre ejerce un control de este desarrollo por medio de la dominancia apical por un período de 134 DDS aproximadamente (diferenciación del meristema floral), donde el cormo del hijo inicia un crecimiento acelerado hasta la emergencia de la bellota que es cuando se rompe definitivamente el control de la planta madre y finalmente alcanza un valor igual a la planta madre al momento de la cosecha.

El crecimiento de las raíces del hijo se inicia en un primer momento durante la diferenciación del meristema apical del cormo de la planta madre (134 DDS) y luego al momento de la emergencia de la bellota, cuando se rompe la dominancia apical de la planta madre, ocurre otro aumento importante en la biomasa de las raíces del hijo, resaltando que al momento de la cosecha, la planta madre y el hijo cuentan con igual biomasa de raíces, este comportamiento permite que la unidad de producción cuente con raíces nuevas activas que mejoran la condición de senescencia de las raíces de la planta madre.

Elseudotallo del hijo inicia su crecimiento al momento de la diferenciación del meristema apical y continúa luego de la emergencia de la bellota con un aumento importante de su biomasa hasta la cosecha de la planta madre. Del mismo modo, las hojas del hijo inician su crecimiento después de la diferenciación del meristema apical, siguiendo un crecimiento moderado hasta los 247 DDS, durante el llenado del racimo, donde sigue un crecimiento exponencial muy acelerado para alcanzar al momento de la cosecha igual biomasa que la planta madre.

El incremento de la biomasa de los nietos extra es lento al principio pero luego que van aumentando en número y tamaño el hijo ejerce un control sobre el crecimiento de igual forma que la planta madre, con valores de 2,7 veces menor que la biomasa de los hijos extra en similar estado fenológico de la planta madre y el hijo.

El compartimiento de necromasa del hijo se divide en dos compartimientos de hojas yseudotallo, donde se observa que durante los primeros muestreos elseudotallo representó la mayor cantidad (59%) y en el último muestreo la relación cambió, aumentando las hojas al 64% del total de la necromasa aérea, producto del desarrollo del área foliar del hijo y el deshoje (tabla III-6).

Comparando la etapa de crecimiento vegetativo de la planta madre y del hijo, a éste le tomó dos veces el tiempo que duró la planta madre para alcanzar similares valores de biomasa en sus órganos, debido a la dominancia apical que ejerce la planta madre.

Tabla III-5. Fitomasa promedio de la planta hijo por compartimiento ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Se incluye al nieto en un solo compartimiento. Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas a  $p<0,05$ .

Compart.	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	C
DDS	0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293
		<b>0,04</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>0,71</b>	<b>1,27</b>	<b>10,28</b>	<b>37,26</b>	<b>47,60</b>	<b>85,75</b>	<b>111,04</b>
Cormo		0,01	0,01	0,02	0,32	0,26	5,17	12,36	26,50	39,13	57,79
		c	c	c	c	c	bc	bc	b	a	a
					<b>0,98</b>	<b>3,06</b>	<b>23,10</b>	<b>60,14</b>	<b>66,78</b>	<b>101,59</b>	<b>133,35</b>
Raíces					0,14	0,74	3,97	15,49	10,50	9,83	21,91
					e	e	d	c	c	b	a
						<b>1,14</b>	<b>9,26</b>	<b>20,28</b>	<b>25,65</b>	<b>80,19</b>	<b>133,23</b>
Seudotallo						0,32	3,25	14,89	16,39	31,63	83,03
						c	c	c	c	b	a
							<b>1,24</b>	<b>11,48</b>	<b>14,43</b>	<b>35,78</b>	<b>122,83</b>
Hojas							0,16	3,95	4,06	16,98	70,94
							b	b	b	b	a
							<b>0,33</b>	<b>1,01</b>	<b>8,44</b>	<b>10,85</b>	<b>21,01</b>
Cormos nietos extra							0,14	0,94	4,11	4,43	10,43
							b	b	a	a	a
									<b>1,85</b>	<b>5,14</b>	<b>15,98</b>
Necromasa aérea total									1,19	4,38	8,17
									b	ab	a
							<b>0,12</b>	<b>0,35</b>	<b>1,45</b>	<b>1,71</b>	<b>2,22</b>
Nieto							0,06	0,21	0,57	0,49	1,04
							b	b	a	a	a

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

Por su parte, el nieto inicia su crecimiento aproximadamente a los 157 DDS, con un crecimiento lento durante 40 días, con aumento constante hasta la H8 en el hijo y emergencia de la bellota en la planta madre, donde se observa una disminución del crecimiento que continua hasta la cosecha de la planta madre (figura III-2, tabla III-5).

Tabla III-6. Necromasa de la planta hijo por compartimiento ( $\text{gMS}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas a  $p<0,05$ .

Compart.	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	C
DDS	0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293
									<b>0,76</b>	<b>0,68</b>	<b>10,25</b>
Hojas									0,34	0,64	6,58
									b	b	a
									<b>1,09</b>	<b>4,46</b>	<b>5,72</b>
Seudotallo (vainas)									0,85	3,73	1,59
									b	a	a

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

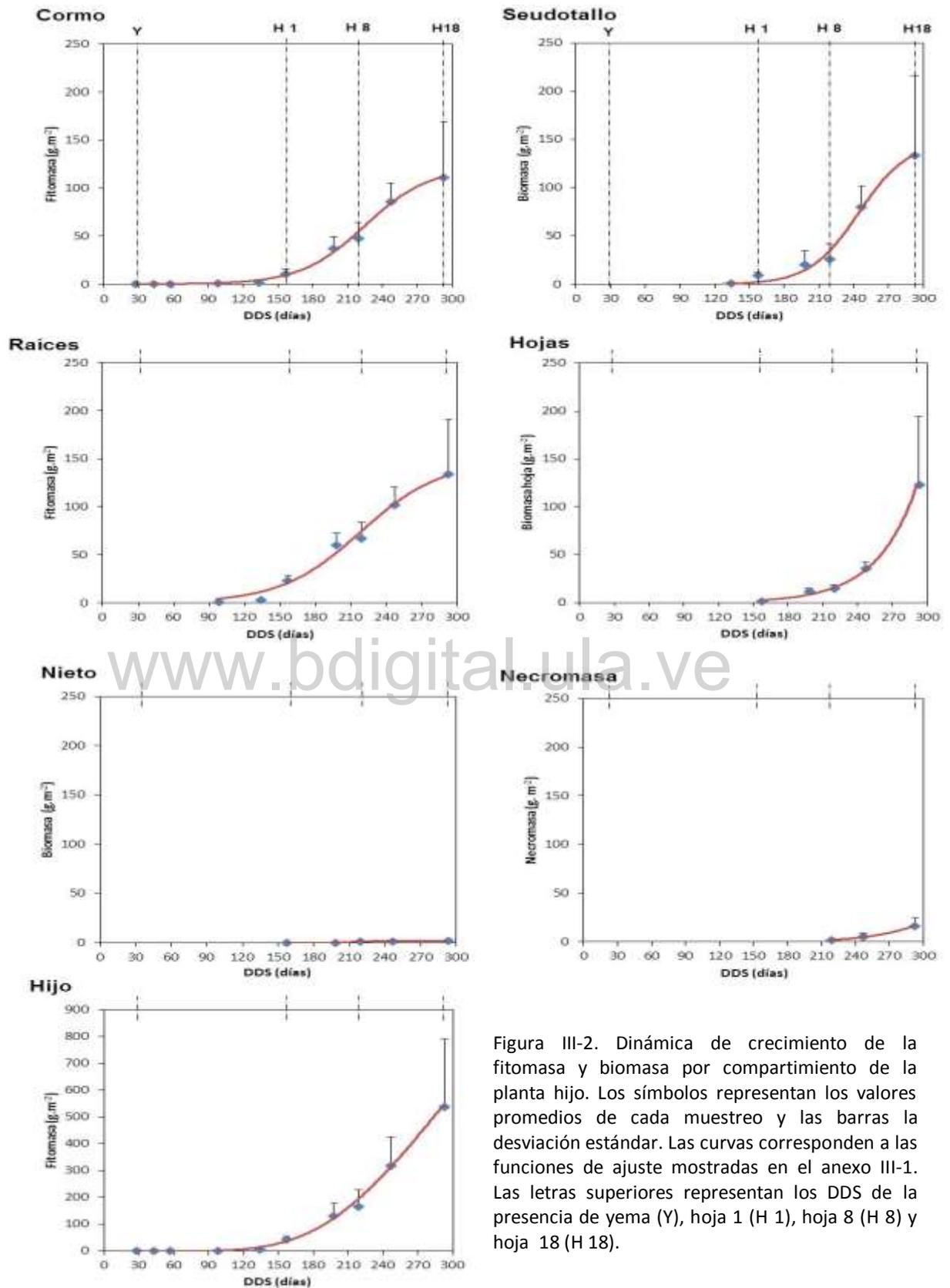


Figura III-2. Dinámica de crecimiento de la fitomasa y biomasa por compartimento de la planta hijo. Los símbolos representan los valores promedios de cada muestreo y las barras la desviación estándar. Las curvas corresponden a las funciones de ajuste mostradas en el anexo III-1. Las letras superiores representan los DDS de la presencia de yema (Y), hoja 1 (H 1), hoja 8 (H 8) y hoja 18 (H 18).

### III.1.3. Distribución entre los órganos de la fitomasa de la planta madre, el hijo y la unidad de producción

En la figura III-3, se muestra la distribución porcentual de la fitomasa entre los órganos. Se observa que en la etapa de crecimiento vegetativo de la planta madre, el cormo fue la principal reserva de asimilados para el desarrollo de los órganos de la planta, con una disminución progresiva en la medida en que los otros órganos, como las raíces, elseudotallo y luego las hojas, incrementan su biomasa, potenciando sus funciones de absorción, asimilación y reserva, mostrando una reducción de las reservas del cormo y una tasa más baja de acumulación con respecto a los otros órganos. En la etapa reproductiva, las raíces, las hojas y elseudotallo fueron los mayores órganos de translocación y donde las hojas son responsables de la asignación de asimilados durante las dos primeras etapas, principalmente alrededor de la diferenciación floral.

En la etapa productiva, desde la emergencia de la bellota la planta inicia el proceso de formación y llenado del racimo, período en el cual se evidencia notoriamente como elseudotallo disminuye su biomasa debido a su función de depósito de fotoasimilados y de reservas que son retranslocadas al racimo, luego con menor impacto siguen el cormo y otros órganos de la planta.

En la distribución de la fitomasa de la planta madre se puede resaltar que al momento de la diferenciación floral la biomasa subterránea fue el 43% del total, la biomasa aérea el 43% y la necromasa de 14%, mientras que al momento de la emergencia de la bellota la biomasa subterránea fue el 32%, la biomasa aérea el 55% y la necromasa el 13%, esta partición de la biomasa es necesaria para soportar luego el crecimiento del racimo y al momento de la cosecha la biomasa subterránea disminuyó al 20%, la biomasa aérea alcanzó el 57%, que incluye al racimo que representa el 36% y el compartimiento de la necromasa aérea total alcanzó el 23%.

Durante la etapa evaluada, se observa para la fitomasa del hijo (figura III-3) que los compartimientos van ajustando sus porcentajes en la medida que van apareciendo nuevos órganos y en general los que disminuyen progresivamente son las raíces y el cormo en relación a los otros que aumentaron, presentando, para el último muestreo, la biomasa subterránea 50%, distribuido en raíces 25%, cormo 21% y los nietos extra 4%, la biomasa aérea el 50%, dividida enseudotallo 25%, hojas 21% y la necromasa 4%. Se observa nuevamente como los cambios en los compartimientos del hijo son más lentos que los mostrados por la madre debido a que el tiempo de desarrollo del hijo es mucho mayor, producto de la dominancia apical ejercida por la planta madre. Esta relación porcentual es equivalente a la relación que alcanza la planta madre alrededor de los 100 DDS.

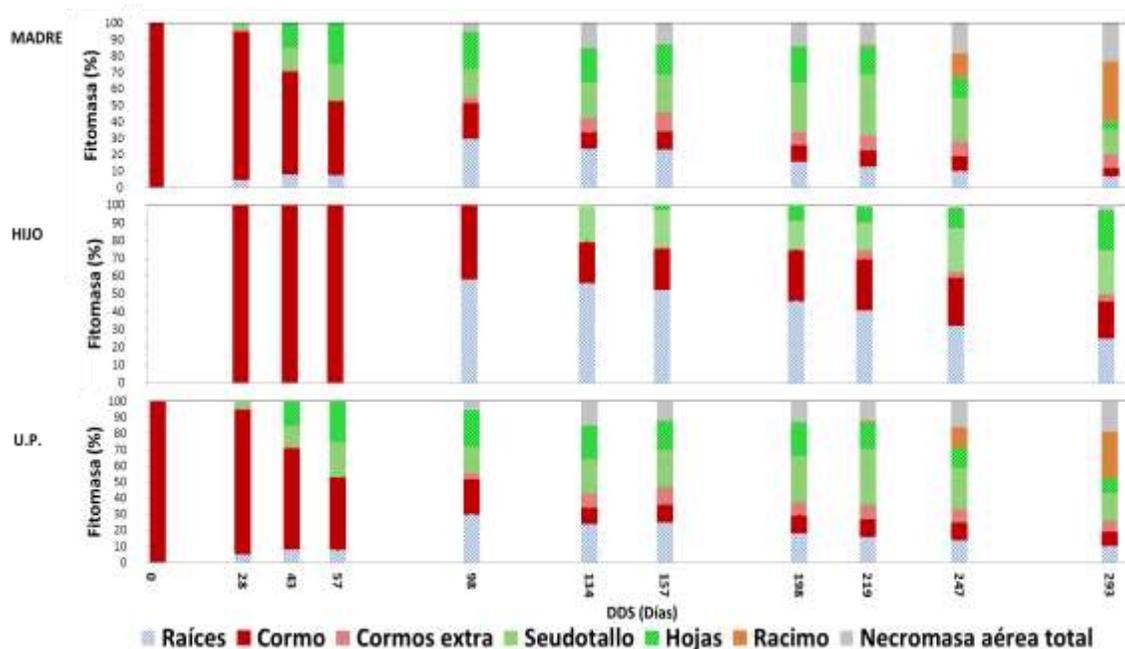


Figura III-3. Distribución porcentual de la fitomasa entre los compartimientos u órganos de la madre, el hijo y la unidad de producción (U.P.) medidos en un cultivo de plátano Hartón, con los días transcurridos después de la siembra (DDS).

Con respecto a la unidad de producción ( figura III-3), el patrón de distribución de la fitomasa sigue el mismo patrón presentado por la planta madre, debido a que ésta a lo largo de la etapa de crecimiento vegetativo representa más del 90% de la fitomasa total, disminuyendo únicamente después de la floración, a valores por encima de 70% de la fitomasa total y el nieto sólo representa el 0,09% de la fitomasa total de la unidad de producción al momento de la cosecha de la planta madre.

### III.1.3.1. Análisis de la distribución vertical y horizontal de la fitomasa radical

Las raíces de la unidad de producción van cambiando su distribución horizontal y vertical a lo largo del ciclo del cultivo (figura III-4). La distribución horizontal, en base a las direcciones de los cuatro puntos cardinales evaluadas, presenta un comportamiento homogéneo, sin diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) entre los puntos en cada profundidad evaluada. Esto nos indica que la planta presenta un patrón radial uniforme de crecimiento de las raíces, lo cual permite promediar los puntos de las cuatro direcciones consideradas y realizar el análisis únicamente en función de la distancia desde el cormo.

En la figura III-4, se observa la distribución horizontal y vertical de las raíces en diferentes períodos. Durante la fase de establecimiento, a los 57 DDS, momento en que la planta madre ha emitido siete hojas, las raíces se concentran en los primeros 40 cm desde el cormo y hasta los 20 cm de profundidad. Al finalizar la fase de establecimiento (98 DDS), sólo 40 días después, las raíces ya se encontraban distribuidas horizontalmente hasta los 100 cm, con un porcentaje de 35% en la distancia de 0 a 40 cm y de 18% en la distancia de 80 a 100 cm, para un total de 80%. En la capa de 20-50 cm, se encontraron las raíces en la distancia de 0 a 40 cm, con el restante 20%.

En la fase de crecimiento vegetativo, alrededor de los 134 DDS, en el momento de la diferenciación floral, existían raíces en todas las combinaciones de distancia por profundidad, donde el porcentaje de raíces disminuyó a medida que aumentaba la distancia al cormo, comenzando con 48% hasta el 10% para la profundidad de 0 a 20 cm y de 9% al 1% en la profundidad de 20 a 50 cm. En la etapa productiva, al momento de la emergencia de la bellota (219 DDS), se obtuvo el mayor tamaño del sistema radicular en la distancia de 0 a 40 cm y de 0 a 20 cm de profundidad con el 46% de las raíces y disminuyó progresivamente hasta la distancia de 80 a 100 cm con 12%; en la profundidad de 20 a 50 cm se mantuvo en todas las distancias desde el cormo alrededor del 5%, manteniendo la proporción de 80:20 para el porcentaje de raíces en las dos profundidades y al momento de la cosecha, se observa una reducción del tamaño del sistema radicular, producto de la senescencia de las raíces de la planta madre, manteniendo el comportamiento de la fase anterior con un cambio en la proporción de 73:27 para la profundidad de 0-20 y 20-50 cm.

#### **III.1.4. Relación entre biomasa aérea y fitomasa subterránea (BA/FS)**

La planta madre presenta una relación BA/FS que está en concordancia con las tres etapas del ciclo del cultivo descritas (tabla III-7). Durante la etapa de crecimiento vegetativo domina la biomasa subterránea producto de la siembra del cormo, luego, a partir de la diferenciación floral se alcanza una relación de uno que indica igual cantidad de biomasa aérea y subterránea; luego de 113 días aproximadamente dobla la relación después de la emergencia de la bellota durante la etapa reproductiva y en la productiva durante el llenado del racimo, al final de la etapa se incrementa nuevamente la relación BA/FS por el predominio de la biomasa aérea (racimo).

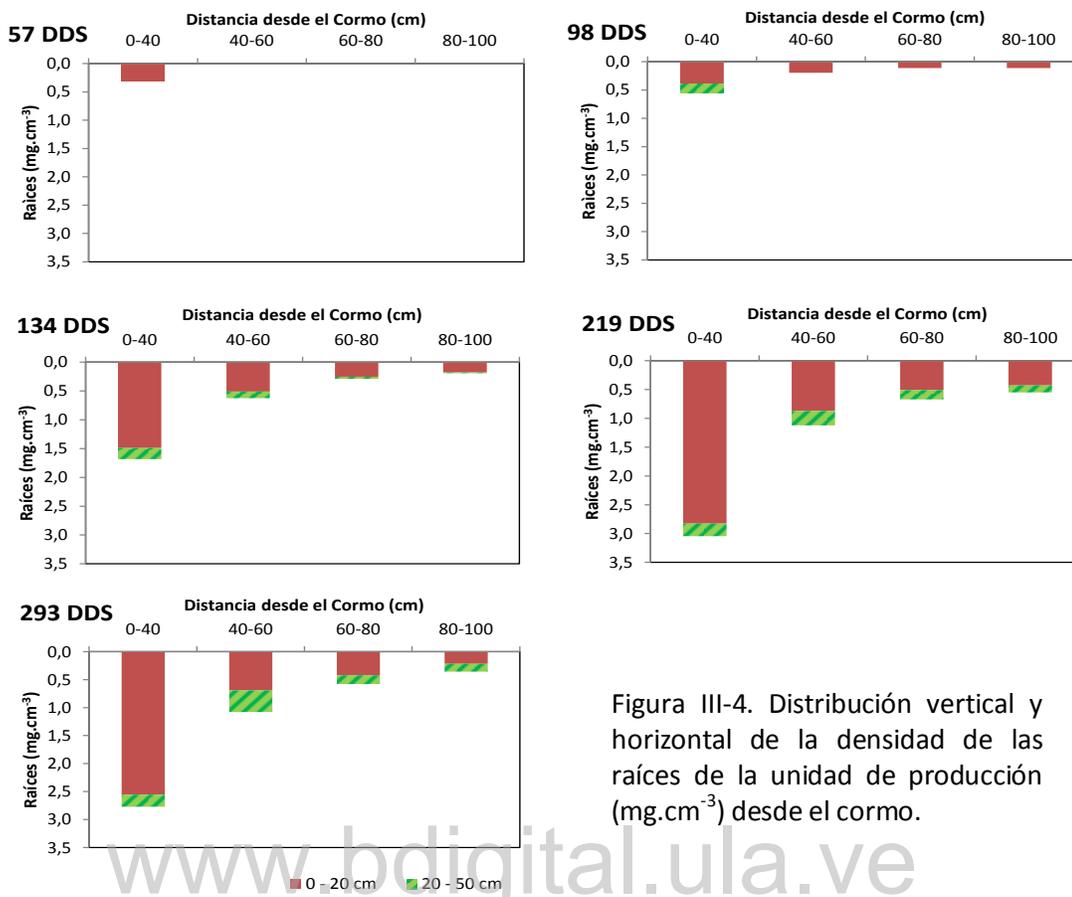


Figura III-4. Distribución vertical y horizontal de la densidad de las raíces de la unidad de producción ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) desde el corno.

La relación BA/FS de la planta hijo, muestra dos períodos, uno de crecimiento casi constante predominando las estructuras subterráneas donde la planta madre ejerce su dominancia apical hasta la emergencia de la bellota, luego se observa un crecimiento de la relación que se duplicó en cada uno de los dos muestreos siguientes alcanzando aproximadamente el valor de uno después de 113 días, al momento de la cosecha de la planta madre, que indica la independencia de la planta hijo que conlleva a los procesos conducentes a la etapa de crecimiento vegetativo similar al estado fenológico que presentó la planta madre al llegar al mismo valor (tabla III-7).

La unidad de producción, presentó una relación BA/FS con un patrón similar al descrito para la planta madre, pero con valores menores en todas las etapas (tabla III-7). Esta disminución puede ocurrir debido a la naturaleza del hijo que induce a la subterranización de la biomasa por su patrón de crecimiento. Queda en evidencia que el manejo del cultivo en este caso las prácticas de deshoje y deshije afectan la biomasa aérea, incrementando la necromasa, reduciendo la relación BA/FS alrededor de 0.75 veces si se compara con la relación FA/FS, por lo tanto el manejo tiene implicaciones muy fuertes en la reducción y dinámica de la biomasa aérea de la planta.

Tabla III-7. Relación Fitomasa Aérea/Fitomasa Subterránea de la unidad de producción (U.P.) y la relación Biomasa Aérea/F. Subterránea para la planta madre y el hijo.

Plantas	Relación	DDS.	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	C
			28	43	57	98	134	157	198	219	247	293
Madre	B. Aérea/F. Subterránea		0,05	0,40	0,89	0,77	1,00	0,90	1,53	1,71	1,92	2,80
Hijo	B. Aérea/F. Subterránea						0,26	0,31	0,32	0,33	0,59	0,96
U.P.	B. Aérea/F. Subterránea		0,05	0,40	0,89	0,75	0,99	0,86	1,33	1,46	1,56	2,07
	F. Aérea/F. Subterránea		0,05	0,40	0,89	0,85	1,32	1,11	1,67	1,80	2,03	2,79

B, biomasa, F, fitomasa, PE, preemergencia, H, hoja, DF, diferenciación floral, EB, emergencia de la bellota, DEB, días después de la emergencia de la bellota, C, cosecha.

### III.1.5. Tasa de crecimiento absoluto y tasa de retranslocación de asimilados

La planta madre, como se muestra en la figura III-5A, presenta una tasa diaria de crecimiento absoluto muy baja durante la fase de establecimiento, que se incrementa exponencialmente durante la etapa de crecimiento vegetativo hasta alrededor de la diferenciación floral donde alcanzó el máximo de  $16,15 \text{ gMS.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ , para luego disminuir hasta la cosecha. Se observa que la tasa de crecimiento del racimo alcanza su valor máximo ( $22,59 \text{ gMS.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ ) 30 días después de la emergencia de la bellota y luego disminuye hasta el momento de la cosecha, este patrón nos indica que entre la diferenciación floral y la emergencia de la bellota no hubo retranslocación sino asignación de asimilados para el crecimiento dentro del seudotallo de la bellota, como ocurre con el resto de los órganos; una vez que ocurre la emergencia de la bellota la planta comienza el proceso de retranslocación de los compartimientos aéreos y subterráneos para el llenado del racimo. En la misma figura se observa la tasa de retranslocación de asimilados, desde la planta madre al racimo, que se inició a los 227 DDS, hasta alcanzar un valor máximo de  $18,02 \text{ gMS.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ , alrededor de los 247 DDS, disminuyendo posteriormente hasta la cosecha. La translocación de asimilados desde otros órganos de la planta madre para el llenado del racimo alcanzó los  $436,53 \text{ gMS.m}^{-2}$ , lo que indica que el 60,33% de la materia seca que constituye el racimo proviene de asimilados retranslocados desde otros órganos de la planta madre, lo que representa el 30,61% de la biomasa total de la planta madre.

La fase de retranslocación de asimilados tiene una duración de 46 días luego de 10 días de emitida la bellota, durante 33 días, más del 50% del flujo diario son asimilados retranslocados hasta alcanzar 80% del llenado del racimo. Esta información indica que el llenado del racimo se hace principalmente a expensas de los órganos de la planta madre, principalmente del seudotallo y del cormo.

En la figura III-5B, se muestra la tasa de crecimiento absoluto de la unidad de producción, la cual alcanza la tasa máxima ( $16,66 \text{ gMS.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ ) alrededor de los 157 DDS. Con respecto a la

tasa de crecimiento del hijo, se observa que el mismo, después de los 28 DDS, recibe al igual que el resto de los órganos, una pequeña cantidad de asimilados que casi no se aprecia en la figura por el orden de los  $0,00005 \text{ gMS.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ , período que dura aproximadamente 40 días, que aumenta paulatinamente hasta la diferenciación del meristema (134 DDS), momento que el crecimiento es compartido entre los asimilados propios y de la planta madre; la tasa de crecimiento disminuye al momento de la emergencia de la bellota ya que el 20% de los asimilados destinados al llenado del fruto depende de los procesos asimilatorios diarios y solo cuando el proceso de llenado está por culminar se evidencia que comienza la retranslocación de la planta madre a la estructura del hijo (punto verde de la figura III-5B), que representa, al momento de la cosecha, la cantidad de  $1,13 \text{ gMS.m}^{-2}$  de asimilados retranslocados de la planta madre al hijo, que representó sólo el 0,2% del peso total del hijo.

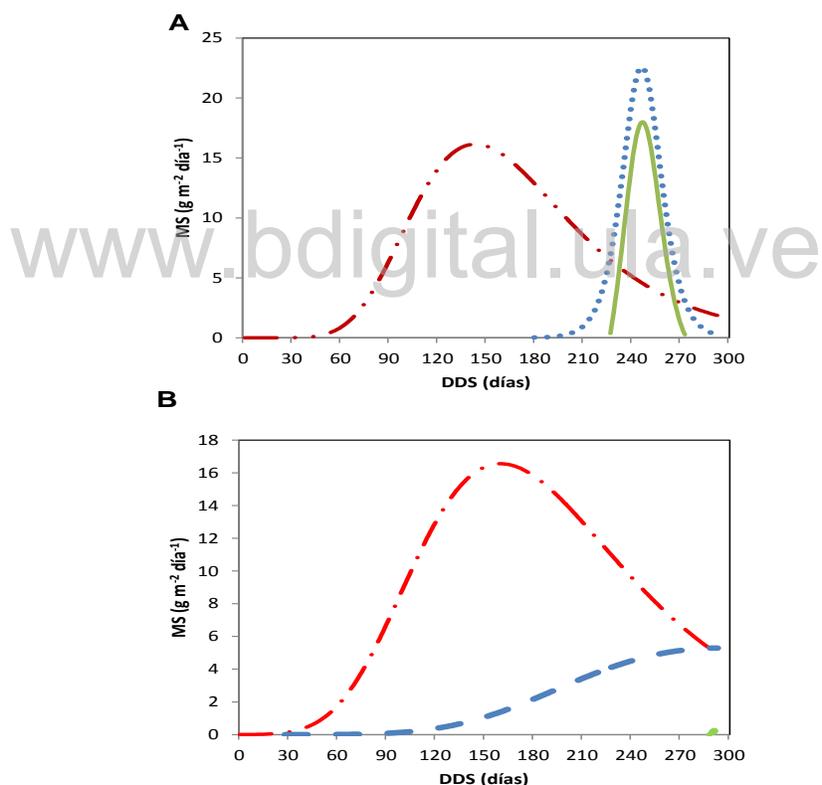


Figura III-5. A. Tasa de crecimiento absoluto de la planta madre (línea trazos y dos puntos), tasa de crecimiento absoluto del racimo (línea punteada) y tasa de retranslocación de asimilados desde la planta madre hacia el racimo (línea continua) y B. tasa de crecimiento absoluto de la unidad de producción (línea trazos y un punto), tasa de crecimiento del hijo (línea trazos) y la tasa de retranslocación de asimilados hacia el hijo (línea continua), con los días después de la siembra.

### **III.1.6. Dinámica del nitrógeno en la planta madre, en el hijo y en la unidad de producción**

#### **III.1.6.1. Concentración de nitrógeno**

La concentración de nitrógeno en los diferentes órganos de la planta madre y en el hijo se presenta en la figura III-6, tablas III-8, III-9, III-10, III-11, III-12. En la planta madre, la concentración de nitrógeno en los compartimientos subterráneos es constante y en los compartimientos de la parte aérea presentó fluctuaciones durante el transcurso del ciclo del cultivo. La concentración de nitrógeno en las raíces de la unidad de producción no presentó diferencias significativas durante todo el ciclo del cultivo fluctuando alrededor de 1,36%. El cormo, durante el ciclo experimenta un aumento paulatino de la concentración hasta la diferenciación floral, luego durante las etapas reproductiva y productiva fluctuó alrededor de 1,50% hasta la cosecha. El seudotallo, al inicio del ciclo presenta el segundo valor más alto después de las hojas y termina con el valor más bajo (0,96%) de todos los compartimientos a excepción del racimo, lo que denota su cambio de función en la planta, al comienzo cumple el rol de estructura asimilatoria o fotosintéticamente activa y al final como estructura netamente de sostén y almacenamiento; sus concentraciones de nitrógeno van acorde con las etapas de crecimiento de la planta descritas anteriormente, donde las mayores concentraciones se observan en la etapa de establecimiento, ya que son las primeras estructuras que se forman a partir del cormo y no han diferenciado las láminas foliares; a medida que crece el seudotallo su concentración disminuye hasta llegar a la emergencia de la bellota, momento que disminuye su concentración probablemente debido a la alta tasa de retranslocación de nitrógeno para el llenado del racimo.

Las hojas de la planta madre presentaron la mayor concentración de nitrógeno con respecto a los demás órganos durante todo el ciclo del cultivo (promedio del ciclo  $2,75 \pm 0,46\%$ ). A nivel de este compartimiento podemos señalar dos períodos de concentración de nitrógeno, el primero de mayores concentraciones casi constantes hasta la diferenciación del meristema foliar en floral, para luego decrecer en el segundo período, que implica sólo el desarrollo de 12 hojas restantes antes de la emisión de la bellota y mantenerse constante hasta la cosecha.

En la formación del racimo se observan dos fases estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ) (tabla III-8), la primera correspondiente a la floración y expansión de las manos y dedos y otra fase de llenado propiamente dicho, con valores de nitrógeno de un tercio del valor inicial. En la tabla III-9, se observa la discriminación de las concentraciones de nitrógeno en las diferentes partes del racimo, donde la alta concentración inicial puede ser producto de las brácteas presentes en la inflorescencia al momento de la emergencia que inicialmente son de tonalidad verde y luego baja

la concentración al cambiar al color púrpura característico del clon y las estructuras florales (en promedio  $1,55 \pm 0,19\%$ ), luego le sigue el raquis con una concentración promedio de  $1,61 \pm 0,18\%$  y los dedos con la concentración más baja (en promedio  $0,73 \pm 0,16\%$ ).

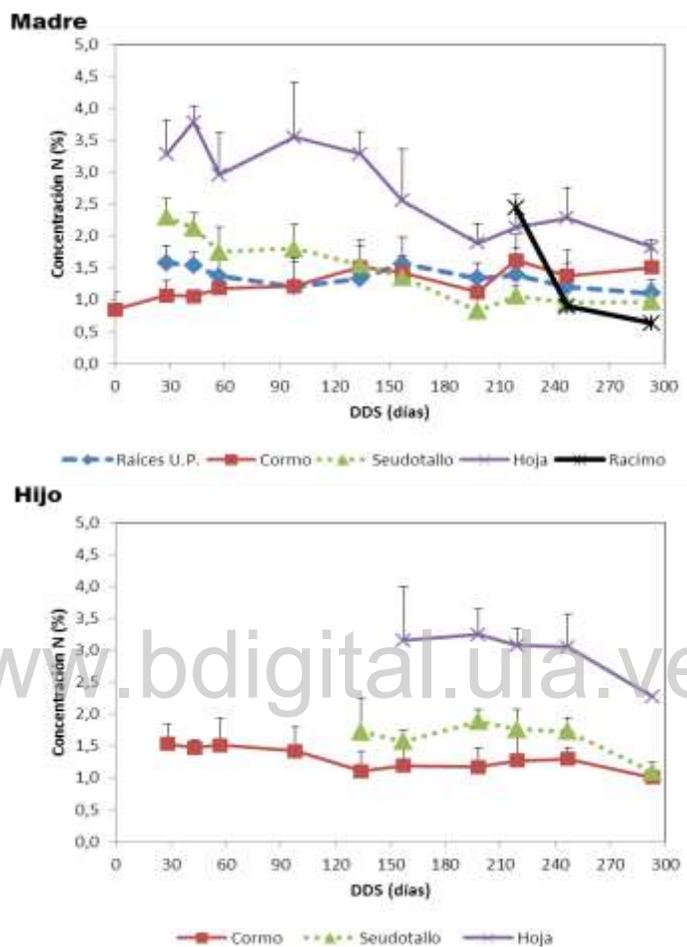


Figura III-6. Concentración de nitrógeno (%) en los órganos de la planta madre y del hijo, la concentración de nitrógeno de las raíces corresponde a la unidad de producción. Las líneas verticales representan el valor de la desviación estándar.

Las concentraciones de nitrógeno de la necromasa de las hojas (tabla III-10) de la planta madre son altas (en promedio  $2,47 \pm 0,35\%$ ) durante todo el ciclo de cultivo, solo ligeramente inferiores a la de las hojas; valor que depende del manejo del cultivo, sobre todo de las actividades de deshoje, que no respeta el ciclo natural de senescencia de los órganos al cortar áreas de hojas verdes junto con áreas enfermas; la necromasa delseudotallo presenta valores más bajos (en promedio  $0,98 \pm 0,21\%$ ) durante todo el ciclo debido a que son estructuras senescentes y la necromasa de los hijos extra producto del deshoje con una concentración alta (en promedio  $1,65 \pm 0,46\%$ ), ya que son trozos deseudotallo y en algunas ocasiones con hojas rudimentarias.

Tabla III-8. Dinámica de la concentración de nitrógeno (%) de la planta madre por compartimiento. La concentración de nitrógeno de las raíces corresponde a la unidad de producción. Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras distintas indican diferencias estadísticas significativas a  $p < 0,05$ .

Compart.	DDS	S	PE	H3	H7	H13	D	H25	H31	EB	28DEB	C	Promedio
		0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293	
Raíces		<b>1,58</b>	<b>1,53</b>	<b>1,36</b>	<b>1,20</b>	<b>1,32</b>	<b>1,56</b>	<b>1,33</b>	<b>1,38</b>	<b>1,19</b>	<b>1,10</b>	<b>1,36</b>	
		0,27	0,22	0,35	0,45	0,11	0,42	0,24	0,42	0,38	0,14	0,30	
		a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
Cormo		<b>0,84</b>	<b>1,06</b>	<b>1,05</b>	<b>1,17</b>	<b>1,21</b>	<b>1,51</b>	<b>1,43</b>	<b>1,11</b>	<b>1,62</b>	<b>1,37</b>	<b>1,50</b>	<b>1,26</b>
		0,30	0,24	0,12	0,43	0,31	0,31	0,27	0,25	0,40	0,40	0,28	0,30
		c	bc	bc	abc	abc	ab	ab	bc	a	ab	ab	
Seudotallo		<b>2,29</b>	<b>2,13</b>	<b>1,75</b>	<b>1,80</b>	<b>1,54</b>	<b>1,35</b>	<b>0,82</b>	<b>1,06</b>	<b>0,95</b>	<b>0,96</b>	<b>1,47</b>	
		0,29	0,23	0,39	0,38	0,38	0,27	0,20	0,16	0,23	0,34	0,29	
		a	ab	bcd	bc	cd	de	f	ef	ef	ef		
Hojas		<b>3,27</b>	<b>3,78</b>	<b>2,95</b>	<b>3,54</b>	<b>3,28</b>	<b>2,55</b>	<b>1,88</b>	<b>2,13</b>	<b>2,28</b>	<b>1,82</b>	<b>2,75</b>	
		0,54	0,24	0,66	0,60	0,35	0,81	0,30	0,52	0,48	0,11	0,46	
		ab	a	bc	ab	ab	cd	de	de	cde	e		
Racimo									<b>2,44</b>	<b>0,89</b>	<b>0,63</b>	<b>1,32</b>	
									0,46	0,16	0,15	0,26	
									a	b	b		

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

Compart.	DDS	EB	28DEB	C	Promedio
		219	247	293	
Inflorescencia (bellota)		<b>2,44</b>			<b>2,44</b>
		0,46			0,46
Raquis		<b>1,49</b>	<b>1,73</b>	<b>1,61</b>	
		0,10	0,25	0,18	
		a	a		
Dedos		<b>0,84</b>	<b>0,61</b>	<b>0,73</b>	
		0,17	0,15	0,16	
		a	a		
Necromasa estructuras florales		<b>1,55</b>	<b>1,55</b>	<b>1,55</b>	
		0,20	0,17	0,19	
		a	a		

Tabla III-9. Concentración de nitrógeno (%) del racimo de la planta madre por compartimiento. Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos ( $p < 0,05$ ).

Tabla III-10. Concentración de nitrógeno (%) de la necromasa aérea de la planta madre por compartimiento. Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos ( $p < 0,05$ ).

Compart.	DDS	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	C	Promedio
		0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293	
Hojas						<b>2,10</b>	nd	<b>2,79</b>	<b>2,72</b>	<b>2,71</b>	<b>2,20</b>	<b>2,32</b>	<b>2,47</b>
						0,27		0,28	0,21	0,38	0,52	0,41	0,35
						b		a	a	a	b	ab	
Seudotallo (vainas)						<b>0,97</b>	nd	<b>0,87</b>	<b>0,89</b>	<b>1,07</b>	<b>1,07</b>	<b>0,98</b>	<b>0,98</b>
						0,10		0,18	0,15	0,17	0,17	0,46	0,21
						a		a	a	a	a	a	
Hijos Extra (seudotallo y hojas)						<b>2,11</b>	<b>1,10</b>	<b>1,53</b>	<b>1,80</b>	<b>1,88</b>	<b>1,45</b>	<b>1,65</b>	
						0,58	0,47	0,22	0,63	0,75	0,10	0,46	
						ab	c	abc	abc	ab	bc		

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha; nd: no dato.

En los órganos del hijo, el cormo presentó una concentración de nitrógeno constante, sin diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) durante el período evaluado, manteniendo una concentración promedio similar al cormo de la planta madre (tabla III-11). Al momento de la cosecha de la planta madre, el hijo ha emitido 18 hojas, por lo que está próximo a la diferenciación del meristema, siguiendo similar patrón en la concentración del seudotallo y las hojas mostrados por la planta madre. Tanto en el seudotallo y la hoja, la concentración no presentó diferencias significativas hasta llegar al período de la diferenciación del meristema. En el seudotallo las concentraciones de nitrógeno oscilaron en torno a  $1,63 \pm 0,32\%$  hasta el momento que se acerca a la diferenciación meristemática, donde su concentración decreció significativamente a  $1,09 \pm 0,21\%$ . En las hojas, la concentración de nitrógeno permaneció constante alrededor de  $3,13 \pm 0,48\%$  durante la emisión de las primeras 14 hojas, para caer bruscamente a  $2,27 \pm 0,49\%$ , representando un diferencial de 0,86, similar al encontrado al momento de la diferenciación del meristema en la planta madre.

Las concentraciones de nitrógeno de los compartimientos de necromasa del hijo permanecieron altas para la hoja (en promedio  $2,03 \pm 0,42\%$ ) durante el ciclo de cultivo; valor que igual como se indica para la planta madre depende del manejo del cultivo sobre todo de las actividades de deshoje; la necromasa de seudotallo presentó similar comportamiento a la concentración de nitrógeno en el mismo compartimiento de la planta madre (tabla III-12).

Con respecto al nieto, la concentración de nitrógeno osciló en torno a  $1,53 \pm 0,21\%$ , similar a la presentada por el hijo al momento de su formación (tabla III-11).

En general la planta madre y el hijo no presentaron diferencias en la concentración de nitrógeno en los mismos estados fenológicos y tuvieron una concentración promedio de nitrógeno superior en las hojas en comparación al resto de los órganos, tanto aéreos como subterráneos, que presentaron valores promedios sin diferencias significativas, alrededor de 1,35%.

#### III.1.6.2. Acumulación y distribución de nitrógeno en las plantas

La cantidad de nitrógeno acumulada en la unidad de producción al momento de la cosecha está distribuida entre la planta madre ( $23,87 \pm 7,20 \text{ gN.m}^{-2}$ ), el hijo ( $7,04 \pm 3,21 \text{ gN.m}^{-2}$ ) y el nieto ( $0,03 \pm 0,01 \text{ gN.m}^{-2}$ ) para llegar a este valor final se partió del cormo madre con  $0,26 \text{ gN.m}^{-2}$ , aumentando continuamente describiendo una curva de Gompertz para finalizar con un total de nitrógeno en la unidad de producción de  $30,94 \text{ gN.m}^{-2}$  o  $156,56 \text{ gN.planta}^{-1}$  después de 293 días de crecimiento.

La dinámica del nitrógeno es similar tanto para la planta madre como para la unidad de producción. En la tabla III-13, se observa que el total de nitrógeno de la planta madre, experimenta un incremento lento durante la etapa de establecimiento, un incremento mayor y sostenido durante la etapa de crecimiento vegetativo que finaliza en la emergencia de la bellota con el valor máximo, donde se inicia la etapa de floración-fructificación con un período de tendencia a mantenerse hasta el final del ciclo, indicando la nula demanda de nitrógeno en esta etapa final.

Tabla III-11. Dinámica de la concentración de nitrógeno (%) de la planta hijo por compartimento y del nieto. Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos por órgano ( $p < 0,05$ ).

Compart.	DDS.	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	C	Promedio
		0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293	
			<b>1,53</b>	<b>1,47</b>	<b>1,51</b>	<b>1,42</b>	<b>1,10</b>	<b>1,19</b>	<b>1,17</b>	<b>1,27</b>	<b>1,29</b>	<b>1,00</b>	<b>1,30</b>
Cormo			0,32	0,13	0,23	0,50	1,72	0,39	0,29	0,43	0,17	0,24	0,44
			a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
							<b>1,72</b>	<b>1,57</b>	<b>1,88</b>	<b>1,76</b>	<b>1,73</b>	<b>1,09</b>	<b>1,63</b>
Seudotallo							0,40	0,53	0,17	0,19	0,31	0,21	0,30
							a	a	a	a	a	b	
								<b>3,15</b>	<b>3,24</b>	<b>3,07</b>	<b>3,04</b>	<b>2,27</b>	<b>2,95</b>
Hojas								0,16	1,09	0,41	0,27	0,49	0,48
								b	b	b	ab	b	
								<b>1,68</b>	<b>1,57</b>	<b>1,26</b>	<b>1,69</b>	<b>1,46</b>	<b>1,53</b>
Nieto								0,15	0,26	0,16	0,20	0,29	0,21
								a	a	b	a	ab	

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

Tabla III-12. Concentración de nitrógeno (%) de la necromasa de la planta hijo por compartimento. Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos ( $p < 0,05$ ).

Compart.	DDS.	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	D	Promedio
		0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293	
										<b>2,13</b>	<b>1,93</b>	<b>2,03</b>	<b>2,03</b>
Hojas										0,20	0,61	0,46	0,42
										a	a	a	
										<b>1,11</b>	<b>1,20</b>	<b>0,78</b>	<b>1,03</b>
Seudotallo (vainas)										0,24	0,17	0,18	0,20
										a	a	a	

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

El nitrógeno acumulado en los órganos de la planta madre se presenta en la tabla III-13, mientras que en el anexo III-2 se presentan las funciones matemáticas que describen el comportamiento de la acumulación de nitrógeno; en el anexo III-3, se muestra la representación gráfica de las funciones matemáticas y los puntos medidos en campo de la acumulación de nitrógeno de la planta y sus órganos. Se observa una diferencia de patrón entre los órganos de almacenamiento y las funcionales, donde el cormo y el seudotallo, como órganos de almacenamiento, presentan una dinámica similar, acumulando nitrógeno sostenidamente hasta alcanzar el máximo valor en la emergencia de la bellota para inmediatamente disminuir hasta la cosecha. Por el contrario las raíces alcanzan el máximo valor un poco después de la hoja 25, aproximadamente dos meses antes que los órganos de almacenamiento, y luego se mantienen constantes durante la etapa reproductiva, hasta alrededor de la emergencia de la inflorescencia cuando disminuye hasta la cosecha. Las hojas presenta al igual que las raíces cambios graduales llegando al máximo durante la etapa de crecimiento vegetativo, manteniéndose hasta la mitad de la etapa productiva para disminuir rápidamente hasta la cosecha. El racimo, recibe por translocación el nitrógeno aportado por los otros órganos; en la tabla III-14, se observa la evolución de la acumulación en los compartimientos donde los dedos acumulan la mayor cantidad de nitrógeno.

El nitrógeno acumulado en los cormos de los hijos extra al igual como ocurre con la biomasa es similar al cormo de la planta madre, por lo tanto debido a la cantidad de nitrógeno acumulado en el compartimiento y dada la dinámica de este elemento, debe ser estudiado para determinar que funciones a parte de la reproductiva puede cumplir en la unidad de producción con el objeto de justificar su permanencia, de lo contrario buscar alternativas más eficientes de deshije con el fin de disminuir su tamaño, debido a que después de seleccionado el hijo de sucesión no es necesario mantenerlos para la reproducción vegetativa en plantaciones comerciales y se disminuiría el gasto de asimilados en el crecimiento y mantenimiento de estas estructuras (tabla III-13).

La necromasa aérea total (tabla III-13) muestra un comportamiento constante durante la etapa de crecimiento vegetativo, aumentando en mayor proporción en la etapa de productiva. En la tabla III-15, se presentan los compartimientos de la necromasa aérea total donde la necromasa de las hojas es el compartimiento que mayor nitrógeno acumula (88%), el seudotallo con el 5% y los hijos extras el 7%. Dada la baja disponibilidad de nitrógeno en los suelos y el apreciable contenido de nitrógeno de la necromasa ésta debe ser una fuente de nitrógeno a ser investigada

para conocer la dinámica de disponibilidad del elemento en este compartimiento en el agroecosistema a través del proceso de descomposición y mineralización.

Tabla III-13. Dinámica del nitrógeno acumulado en la fitomasa de la planta madre y sus compartimientos (gN.m<sup>-2</sup>). Los valores en números pequeños corresponden a la desviación estándar, letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre los muestreos a p<0,05, los cuadros denotan valores máximos.

Organo	DDS	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	C
		0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293
		<b>0,26</b>	<b>0,28</b>	<b>0,22</b>	<b>0,21</b>	<b>0,42</b>	<b>0,90</b>	<b>1,50</b>	<b>1,67</b>	<b>2,74</b>	<b>2,28</b>	<b>1,65</b>
Cormo		0,12	0,08	0,13	0,18	0,04	0,48	0,37	0,47	1,04	0,78	0,34
		e	e	e	e	e	de	cd	bc	a	ab	bc
		<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,05</b>	<b>0,56</b>	<b>1,93</b>	<b>3,72</b>	<b>3,16</b>	<b>3,12</b>	<b>2,32</b>	<b>1,46</b>	
Raíces		0,01	0,03	0,04	0,18	0,35	1,25	0,74	0,53	0,64	0,35	
		e	e	e	e	cd	a	ab	ab	bc	d	
		<b>0,03</b>	<b>0,09</b>	<b>0,16</b>	<b>0,50</b>	<b>2,11</b>	<b>3,00</b>	<b>3,71</b>	<b>6,89</b>	<b>4,57</b>	<b>2,94</b>	
Seudotallo		0,01	0,05	0,09	0,18	1,02	0,79	0,95	0,73	0,66	0,89	
		d	d	d	cd	c	b	ab	a	b	bc	
		<b>0,003</b>	<b>0,18</b>	<b>0,34</b>	<b>1,32</b>	<b>4,29</b>	<b>4,68</b>	<b>6,12</b>	<b>6,12</b>	<b>5,29</b>	<b>1,83</b>	
Hojas		0,002	0,10	0,21	0,31	1,16	1,62	1,02	1,54	1,10	0,50	
		d	d	d	cd	b	b	a	a	ab	c	
									<b>0,53</b>	<b>2,36</b>	<b>4,28</b>	
Racimo									0,07	0,07	0,22	
									c	b	a	
		<b>0,004</b>	<b>0,003</b>	<b>0,002</b>	<b>0,09</b>	<b>0,73</b>	<b>1,35</b>	<b>1,45</b>	<b>2,03</b>	<b>2,20</b>	<b>1,64</b>	
Cormos hijos extra		0,002	0,001	0,001	0,07	0,69	0,38	0,73	0,62	1,05	0,80	
		c	c	c	c	bc	ab	ab	a	a	ab	
					<b>0,16</b>	<b>2,09</b>	<b>3,04</b>	<b>4,81</b>	<b>5,29</b>	<b>7,07</b>	<b>10,07</b>	
Necromasa aérea total					0,02	0,37	0,72	1,21	0,90	1,99	4,10	
					d	cd	bc	bc	bc	ab	a	
		<b>0,26</b>	<b>0,35</b>	<b>0,53</b>	<b>0,76</b>	<b>3,05</b>	<b>12,05</b>	<b>17,29</b>	<b>20,92</b>	<b>26,72</b>	<b>26,09</b>	<b>23,87</b>
Total madre		0,12	0,10	0,31	0,52	0,80	4,07	5,13	5,12	5,43	6,29	7,20
		d	d	d	d	c	b	ab	ab	a	a	a

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha; los cuadros indican los valores máximos.

Compart.	DDS	EB	28DEB	C
		219	247	293
		<b>0,53</b>		
Inflorescencia		0,07		
		a		
		<b>0,39</b>	<b>0,25</b>	
Raquis		0,02	0,04	
		a	b	
		<b>1,97</b>	<b>4,03</b>	
Dedos		0,05	0,18	
		b	a	
Necromasa estructuras florales		<b>0,34</b>	<b>0,29</b>	
		0,06	0,07	
		a	a	

Tabla III-14. Nitrógeno acumulado en los compartimientos del racimo de la planta madre (gN.m<sup>-2</sup>). Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos a p<0,05.

Tabla III-15. Nitrógeno acumulado en los compartimientos de necromasa aérea de la planta madre ( $\text{gN.m}^{-2}$ ). Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas a  $p < 0,05$ .

Compart.	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	C
DDS.	0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293
Hojas					<b>0,15</b>	<b>1,80</b>	<b>2,84</b>	<b>4,18</b>	<b>4,61</b>	<b>5,88</b>	<b>8,88</b>
					0,02	0,33	0,66	1,12	1,13	2,02	4,07
					e	d	cd	bc	bc	b	a
Seudotallo (vainas)					<b>0,01</b>	<b>0,08</b>	<b>0,16</b>	<b>0,22</b>	<b>0,26</b>	<b>0,25</b>	<b>0,32</b>
					0,003	0,03	0,10	0,11	0,06	0,09	0,20
					d	cd	bc	abc	ab	ab	a
Hijos Extra (seudotallo y hojas)					<b>0,22</b>	<b>0,08</b>	<b>0,42</b>	<b>0,50</b>	<b>0,61</b>	<b>0,59</b>	
					0,10	0,07	0,13	0,14	0,34	0,28	
					bc	c	ab	a	a	a	

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

La acumulación de nitrógeno en el hijo (tabla III-16) sigue el mismo comportamiento de la biomasa del cormo, con bajo crecimiento durante la etapa de crecimiento vegetativo de la planta madre donde se ejerce mayor dominancia apical que disminuye luego de la diferenciación y la emergencia de la bellota cuando la acumulación de nitrógeno del hijo fue mayor. Solo se resalta que durante la segunda mitad de la etapa de floración-fructificación los compartimientos del cormo, seudotallo y nieto disminuyen la tasa de acumulación de nitrógeno, contrario ocurre con las raíces y hojas que aumentan hasta la cosecha de la madre; los cormos de los nietos extra, presentan un aumento sostenido en el nitrógeno acumulado hasta el término del ensayo.

La necromasa (tabla III-17) presentó similar comportamiento a la acumulación de biomasa, mayor cantidad en las hojas que el seudotallo. El nieto que presenta una acumulación muy pequeña, presentó un comportamiento similar al cormo del hijo. En general el hijo presentó una curva de crecimiento clásica sostenida en el tiempo hasta la cosecha de la planta madre (anexo III-4).

III.1.6.3. Distribución de nitrógeno entre los órganos de la planta madre, el hijo y la unidad de producción.

El patrón de distribución de nitrógeno acumulado por órgano en relación a la cantidad total de la planta madre, el hijo y la unidad de producción se muestra en la figura III-7. Durante la etapa de establecimiento, el cormo contiene todo el nitrógeno de la planta y va a constituirse en una fuente para los demás órganos. A partir de los 57 DDS y durante todo el período vegetativo hasta la diferenciación del meristema apical, las hojas son el principal órgano de acumulación de nitrógeno, mientras que las raíces y el seudotallo acumulan en menor proporción, luego se

estabiliza el patrón de repartición hasta la emergencia de la bellota cuando todos los compartimientos disminuyen y aumenta el nitrógeno acumulado en el racimo; además se observa que el nitrógeno en la biomasa de los hijos extra, presenta un porcentaje similar al corno de la madre después de la diferenciación floral hasta el final de ciclo, mostrando que es un compartimiento demandante de nitrógeno para su mantenimiento.

Tabla III-16. Dinámica del nitrógeno acumulado en la fitomasa de la planta hijo, compartimientos y el nieto ( $\text{gN.m}^{-2}$ ). Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre muestreos a  $p < 0,05$ .

Organo	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB.	28DEB	C
	DDS	0	28	43	57	98	134	157	198	219	247
		<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,13</b>	<b>0,45</b>	<b>0,62</b>	<b>1,09</b>	<b>1,08</b>
Corno		0,0004	0,0002	0,0006	0,010	0,010	0,09	0,20	0,53	0,48	0,58
		c	c	c	c	c	bc	bc	ab	a	a
					<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,36</b>	<b>0,79</b>	<b>0,89</b>	<b>1,19</b>	<b>1,47</b>
Raíces					0,01	0,01	0,12	0,18	0,15	0,33	0,36
					e	e	d	c	c	b	a
					<b>0,02</b>	<b>0,12</b>	<b>0,39</b>	<b>0,45</b>	<b>1,32</b>	<b>1,35</b>	
Seudotallo					0,010	0,04	0,31	0,29	0,40	0,70	
					b	b	b	b	a	a	
					<b>0,04</b>	<b>0,40</b>	<b>0,48</b>	<b>1,06</b>	<b>2,58</b>		
Hojas					0,003	0,28	0,13	0,45	1,29		
					b	b	b	b	a		
					<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,11</b>	<b>0,19</b>	<b>0,29</b>		
Cormos nietos extra					0,003	0,01	0,07	0,08	0,10		
					c	c	bc	ab	a		
					<b>0,02</b>	<b>0,06</b>	<b>0,27</b>				
Necromasa aérea total					0,01	0,03	0,18				
					b	b	a				
		<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	<b>0,02</b>	<b>0,07</b>	<b>0,66</b>	<b>2,04</b>	<b>2,57</b>	<b>4,91</b>	<b>7,04</b>
Total hijo		0,0004	0,0002	0,001	0,02	0,03	0,26	0,98	1,18	1,77	3,21
		e	e	e	e	e	d	c	bc	ab	a
					<b>0,004</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>		
Nieto					0,0007	0,004	0,01	0,01	0,01		
					c	c	b	ab	a		

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

Tabla III-17. Nitrógeno acumulado en el compartimiento de necromasa de la planta hijo ( $\text{gN.m}^{-2}$ ). Los valores en números más pequeños corresponden a la desviación estándar y letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas a  $p < 0,05$ .

Compart.	S	PE	H3	H7	H13	DF	H25	H31	EB	28DEB	C
	DDS.	0	28	43	57	98	134	157	198	219	247
									<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,22</b>
Hojas									0,004	0,01	0,16
									b	b	a
									<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>
Seudotallo (vainas)									0,01	0,03	0,02
									a	a	a

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

La necromasa aérea total en la planta madre, que como ya vimos consiste principalmente en hojas pre-senescentes que son cortadas como parte del manejo agronómico, es un compartimiento importante debido a que en ella retorna al suelo progresivamente gran parte del nitrógeno absorbido por la planta (42%) y luego de la cosecha se incorporan también todos los compartimientos a excepción del racimo que se exporta del agroecosistema, por lo que retorna al sistema un 40% de nitrógeno adicional, es decir que el 82% del nitrógeno absorbido por la planta madre no es exportado por la cosecha sino incorporado al suelo a través de la necromasa, lo que constituye un valor particularmente alto para un cultivo.

Con respecto al hijo (figura III-7), se observa que inicialmente los compartimientos del cormo y las raíces son muy importantes durante el período que transcurre durante la fase de establecimiento de la planta madre, luego progresivamente se equilibra el tamaño de los compartimientos con una distribución más homogénea entre los órganos luego del inicio de la formación del seudotallo, hojas y raíces, observándose al final del ciclo una acumulación de nitrógeno en las hojas similar a la planta madre en igual etapa fenológica.

El patrón de distribución de nitrógeno de la unidad de producción, está dominado por las tendencias de los compartimientos de la planta madre (figura III-7), situación que es corroborada en la figura III-8, donde se observa que hasta la emergencia de la inflorescencia la planta madre contiene sobre el 90% del nitrógeno acumulado y al momento de la cosecha más del 70% del nitrógeno acumulado por la unidad de producción.

### **III.1.7. Tasa de acumulación y tasa de retranslocación de nitrógeno**

La tasa diaria de acumulación de nitrógeno en la planta madre se obtiene como la derivada de la curva de Gompertz que describe el N total acumulado en la planta madre (anexo III-5). Esta tasa de acumulación (figura III-9A) nos indica aproximadamente la tasa de absorción de nitrógeno por la planta madre si se considera que no hay pérdidas de nitrógeno durante el desarrollo. Se observa que en la fase de establecimiento y hasta los 60 DDS la tasa de acumulación es muy baja y luego se presenta un comportamiento exponencial, producto del crecimiento acelerado de las hojas hasta alcanzar el máximo ( $0,28 \text{ gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ ) alrededor de los 126 DDS para disminuir durante la etapa reproductiva después de la diferenciación y productiva hasta el valor de  $0,005 \text{ gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$  en la cosecha. La tasa de acumulación de nitrógeno en el racimo, aumentó muy lentamente desde la diferenciación floral a los 134 DDS hasta un poco antes de la emergencia de la bellota (180 DDS) alcanzando un máximo de  $0,08 \text{ gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$  a los 244 días, para luego disminuir hasta la cosecha a  $0,008 \text{ gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ .

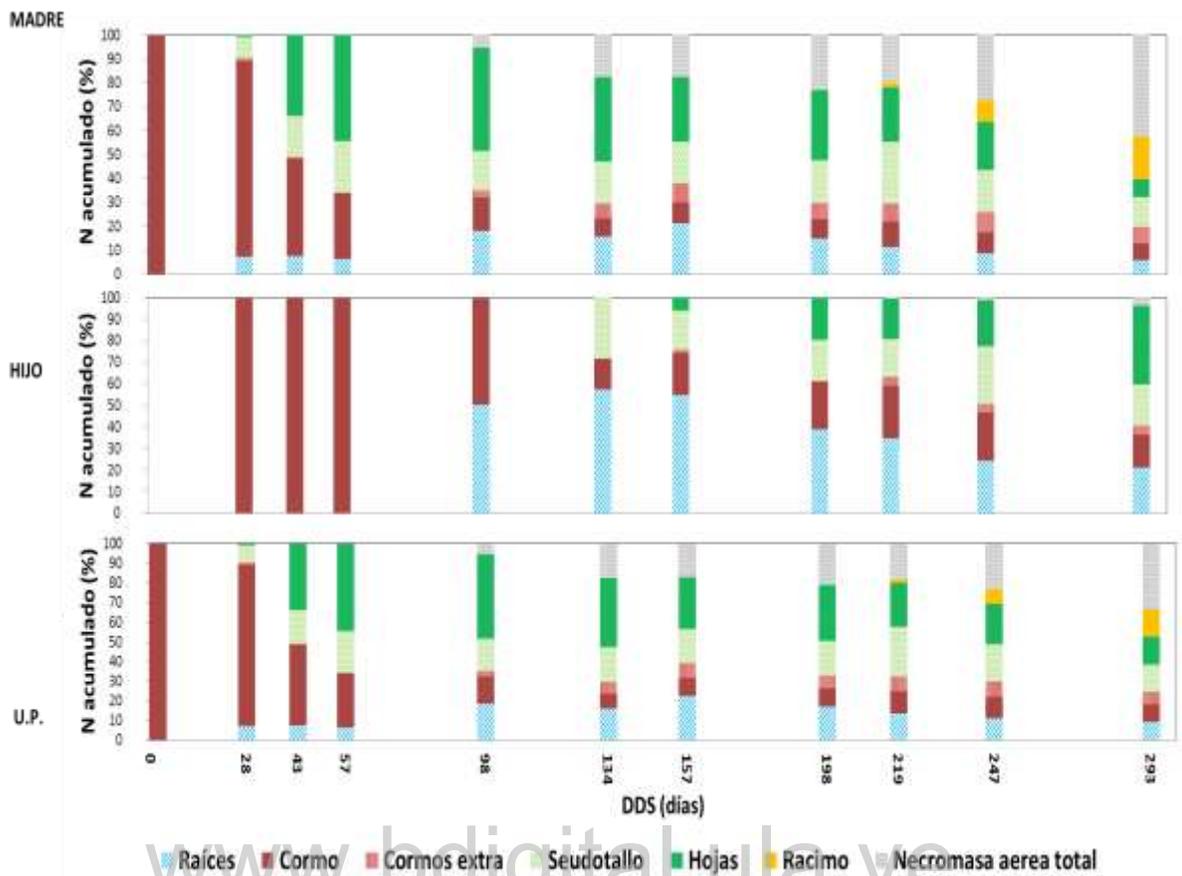


Figura III-7. Distribución porcentual del nitrógeno acumulado entre los compartimientos para la planta madre, el hijo y la unidad de producción del plátano Hartón, con los días transcurridos después de la siembra.

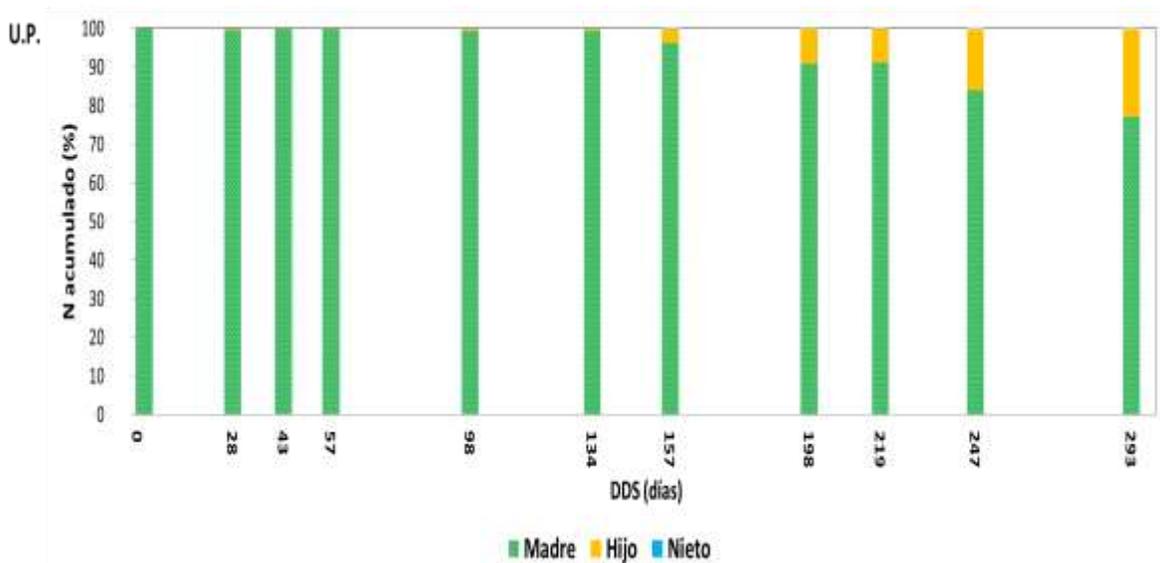


Figura III-8. Distribución porcentual del nitrógeno almacenado en la unidad de producción entre la madre, el hijo y el nieto al momento de la cosecha de la madre.

La retranslocación de nitrógeno de los compartimientos aéreos y subterráneos al racimo de la planta madre, se inició alrededor de los 223 DDS, llegando a una tasa máxima de  $0,06 \text{ gN.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$  a los 247 DDS, que coincide aproximadamente con la mitad del período de llenado del racimo y disminuyendo luego hasta la cosecha (figura III-9A). La cantidad de nitrógeno que migra hacia el racimo durante este lapso de tiempo, alcanzó un total de  $2,36 \text{ gN.m}^{-2}$ , que en términos relativos a la cantidad de nitrógeno acumulado por la planta representa el 9,13% y con respecto al nitrógeno acumulado por el racimo el 55,47%.

La figura III-9B, muestra la tasa diaria de acumulación de nitrógeno de la unidad de producción con un valor máximo de  $0,27 \text{ gN.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$  alrededor de los 134 DDS, siguiendo el mismo patrón observado en la tasa de crecimiento absoluto (figura III-5B). Por su parte, la tasa de acumulación de nitrógeno del hijo en relación a la unidad de producción, presenta un comportamiento similar a la tasa absoluta de crecimiento del hijo con la diferencia que luego de alcanzar el máximo valor de  $0,06 \text{ gN.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$  a los 244 DDS tiende a disminuir hasta los  $0,05 \text{ gN.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$  al momento de la cosecha. La tasa diaria de retranslocación de asimilados de la unidad de producción al hijo llega a  $0,03 \text{ gN.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$  al momento de la cosecha, con una cantidad de nitrógeno que migra hacia el hijo durante este período de  $1,01 \text{ gN.m}^{-2}$ , que en términos relativos a la cantidad de nitrógeno acumulado por la unidad de producción representa el 3,23% y con respecto al nitrógeno acumulado por el hijo 14,30%. Es de recalcar que la dinámica de acumulación de nitrógeno por el hijo es muy diferente a la de la madre, sobre todo si se comparan los valores máximos ( $0,28$  y  $0,06 \text{ gN.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$  respectivamente), por lo que la fertilización debería ser reajustada en ciclos sucesivos.

### **III.1.8. Relación carbono/nitrógeno (C/N) de la planta madre, el hijo y nieto**

La relación carbono/nitrógeno se determinó dividiendo la concentración de carbono que se asumió constante para todos los órganos de la planta en 40%, entre la concentración de nitrógeno del órgano respectivo.

La relación C/N de la planta madre, presenta inicialmente entre la siembra y la preemergencia una relación alta, característica de los órganos de almacenamiento, luego disminuye por la absorción de nitrógeno por la planta manteniendo una relación constante durante la etapa de crecimiento vegetativo, aumentando ligeramente hacia la emergencia de la bellota donde permanece constante durante la etapa de floración-fructificación, lo que indica que la planta acumula nitrógeno (tabla III-18). A nivel de los compartimientos se observa que en

promedio todos presentan valores por encima de 29 a excepción de las hojas y la necromasa aérea, lo que indica que las estructuras son de buena calidad, cualidad que influye directamente en el proceso de descomposición de la materia orgánica y el ciclado de nutrientes, incluyendo la necromasa que como se ha indicado no sigue un proceso normal de senescencia. El compartimiento que experimenta un cambio contrastante en la relación C/N es el seudotallo que sigue a lo largo de las etapas de crecimiento de la planta el cambio de función al inicio durante la etapa de establecimiento mantiene una relación de estructura fotosintética con una relación baja que se incrementa durante la etapa de crecimiento vegetativo para finalizar durante la etapa productiva con una relación alta de estructura de almacenamiento y sostén.

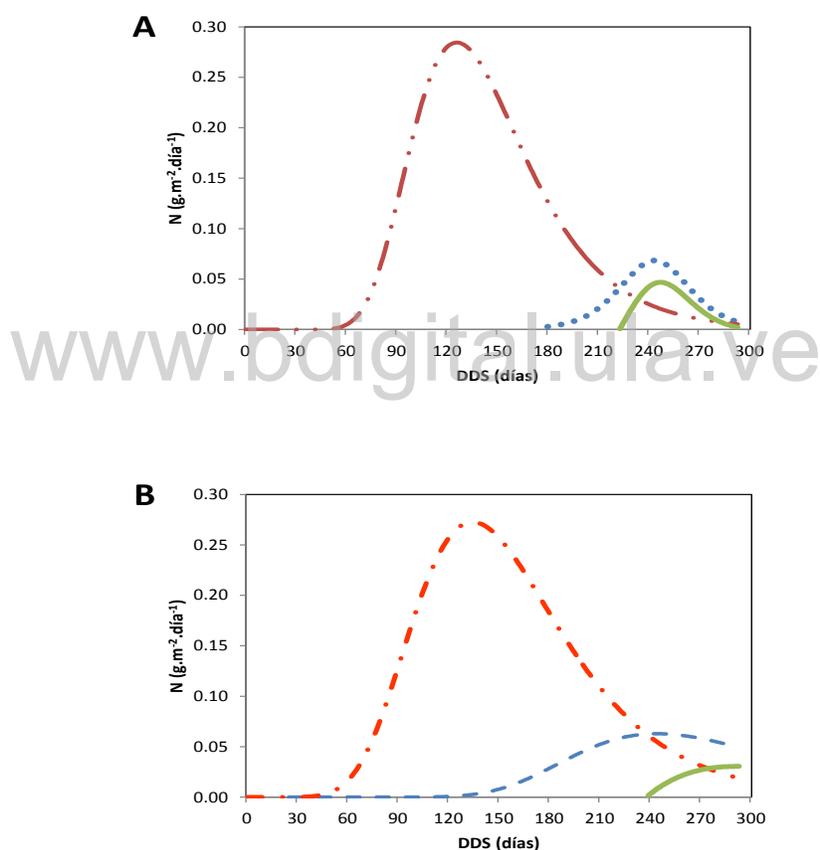


Figura III-9. Tasa diaria de acumulación de nitrógeno en A. la planta madre (línea a trazos y dos puntos), racimo (línea punteada) y tasa de retranslocación de nitrógeno hacia el racimo (línea continua) y B. tasa de acumulación de nitrógeno de la unidad de producción (línea a trazos y un punto), del hijo (línea a trazos) y la tasa de retranslocación de nitrógeno hacia el hijo (línea continua), con los días después de la siembra.

Con respecto al hijo (tabla III-18), sigue un comportamiento similar al que experimenta la planta madre durante la etapa de crecimiento vegetativo, con la principal diferencia en la relación del cormo que es baja al inicio de la formación cuando está creciendo la yema que se transformará en el cormo, para luego tomar valores acordes al tipo de estructura de almacenamiento. El nieto, en este caso presenta similar comportamiento al hijo durante la misma fase de crecimiento.

Tabla III-18. Relación carbono/nitrógeno (C/N) de la planta madre, hijo, nieto y compartimientos.

Compart.	S PE H3 H7 H13 DF H25 H31 EB 28 DEB C												Media	DS
	DDS	0	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293		
Cormo	49,9	39,6	36,4	37,0	34,3	27,2	28,1	35,7	24,4	29,3	26,6	33,5	7,4	
Raíces		21,4	26,9	26,0	35,5	30,7	25,5	30,5	30,0	34,1	36,1	29,7	4,8	
Seudotallo		17,4	19,0	23,3	22,2	25,4	30,2	49,1	37,8	43,7	42,0	31,0	11,3	
Hojas		11,2	10,7	12,9	11,5	12,4	15,9	21,3	19,0	17,6	21,9	15,4	4,3	
Racimo									17,6	58,8	80,0	52,1	31,7	
Cormos hijos extra		22,8	27,7	24,5	27,3	31,7	34,7	33,7	32,1	30,5	39,7	30,5	5,1	
Necromasa aérea					20,6	17,4	16,4	17,0	17,2	19,1	18,1	18,0	1,5	
Total madre	49,9	35,6	24,0	22,6	21,8	23,8	23,0	28,7	26,3	29,7	34,7	29,1	8,4	
Cormo		22,0	27,3	16,1	28,5	50,7	31,6	33,1	30,7	31,5	41,1	31,3	9,5	
Raíces					39,2	30,6	25,7	30,5	30,0	34,1	36,3	32,3	4,5	
Seudotallo						22,8	30,9	20,8	22,8	24,3	39,5	26,8	7,1	
Hojas							12,4	11,5	12,0	13,5	19,0	13,7	3,1	
Cormos nietos extra							13,1	40,6	30,7	22,8	29,0	27,2	10,1	
Necromasa aérea									37,0	34,3	23,7	31,7	7,1	
Total hijo		22,0	27,3	16,1	33,8	31,2	29,5	28,3	28,5	26,2	32,5	27,5	5,2	
Nieto							13,7	13,9	29,0	22,8	29,6	21,8	7,8	

DDS: días después de la siembra; S: siembra; PE: preemergencia; H: hoja; DF: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; DEB: días después de la emergencia de la bellota; C: cosecha.

### III.1.9. Curva de dilución de nitrógeno

Las plantas de plátano no presentaron el patrón de dilución normal esperado según la curva de dilución de Greenwood *et al.* (1990), aplicable según el autor a las plantas C3 (Figura III-10). La discrepancia se produce durante la primera etapa de desarrollo, cuando las concentraciones de nitrógeno son más bajas que lo esperado según la curva de Greenwood y además no siguen el comportamiento de descenso exponencial a medida que crece la planta. Esto se debe probablemente al tipo de reproducción vegetativa característica de este cultivo, la cual se realiza a partir del cormo (semilla) que es un órgano con muy baja concentración de nitrógeno (ver tabla III-8). De forma que el plátano en vez de diluir la concentración de nitrógeno a medida que aumenta su biomasa, pasa por una fase de aumento de la concentración de nitrógeno (fase de establecimiento de 0,80 a 1,99%). Es solamente a partir de una biomasa del cultivo entre 6 a 7 MgMS.ha<sup>-1</sup> que la curva de la planta comienza a seguir la curva de dilución de Greenwood y a experimentar un proceso de dilución.

Analizando este problema con nuestros datos, proponemos una modificación para esta primera parte del desarrollo del cultivo que permita calcular la concentración de nitrógeno:

$$\%N = 0,1235 * \ln(W) + 1,8461$$

donde W es la producción en  $MgMS.ha^{-1}$ ,  $R^2 = 0.90$ .

En la figura III-10, se presenta la modificación propuesta, donde se observa que en las primeras etapas del cultivo se produciría una concentración en vez de dilución de nitrógeno y luego, a partir de las 7  $MgMS.ha^{-1}$ , la curva se comporta igual que la curva de Greenwood.

Con respecto a la planta hijo (figura III-10), también es difícil aplicar el enfoque de la curva de dilución de Greenwood ya que se trata de una parte de la unidad de producción y no de una entidad independiente. Sin embargo, al comparar con la curva de línea sólida construida para la planta madre, observamos que a igual biomasa la concentración de nitrógeno del hijo es algo menor, lo que eventualmente podría estar sugiriendo un pequeño déficit o bien ser consecuencia de que el hijo, en esta etapa, recibe asimilados de la madre y por lo tanto no despliega su potencial productivo, o bien concentre menos nitrógeno por estar a la sombra de la madre.

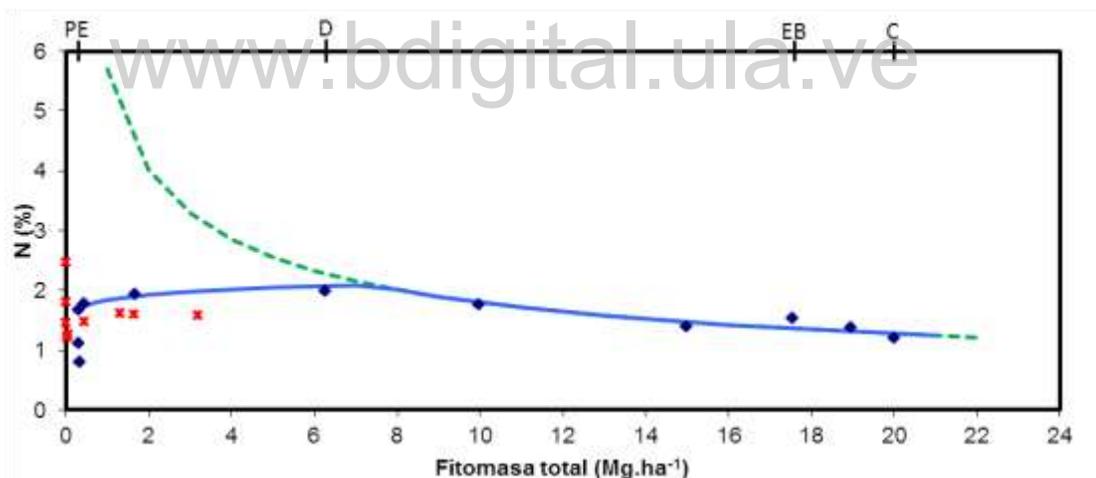


Figura III-10. Curva del porcentaje de nitrógeno en el cultivo de plátano Hartón en función de su fitomasa total. Los rombos son los datos de campo de la madre, la línea sólida es la curva propuesta para el plátano, la línea a trazos es la curva de dilución de Greenwood *et al.* (1990) para plantas C3 ( $\%N_{crítico}=5,7W^{-0,5}$ ); las equis son los datos de campo de la planta hijo. PE: período de establecimiento; D: diferenciación floral; EB: emergencia de la bellota; C: cosecha.

### III.1.10. Índice de nutrición de nitrógeno (INN)

La curva del INN que se observa en la figura III-11 se obtiene dividiendo la concentración de N en la planta entre la concentración crítica proveniente de la curva adaptada de Greenwood. Puede verse que durante la etapa de establecimiento, al iniciarse el desarrollo a partir del cormo,

la planta pasa por un período inicial de poco más de un mes de duración con una concentración de nitrógeno baja, resultante del predominio del cormo en la biomasa total. Esto sería un déficit aparente ya que es fisiológico y no se podría suprimir aumentando la disponibilidad; durante este período el nitrógeno aumenta posiblemente por un efecto de concentración ya que el cormo pierde biomasa por respiración; a partir del segundo mes, no vuelve a observarse déficit de nitrógeno, manteniéndose el cultivo prácticamente en el valor de 1 del INN. Al inicio de la etapa productiva alrededor de la emergencia de la bellota pareciera haber un período de acumulación suntuosa de nitrógeno que podría obedecer a la posterior retranslocación principalmente hacia el racimo.

El INN calculado para la planta hijo (figura III-11) presentó un comportamiento, durante la fase de establecimiento de la planta madre, caracterizado por fluctuaciones drásticas durante la formación del cormo que se estabiliza en el valor crítico luego del inicio de la formación de las demás estructuras de la planta, con una disminución hacia el final de la etapa productiva de la planta madre, período en que el hijo está próximo a la diferenciación floral, similar tendencia pero más leve se observó en la planta madre en ese período.

### **III.1.11. Índice de área foliar, radiación fotosintéticamente activa interceptada y eficiencia del uso de la luz**

El índice de área foliar (LAI) de la unidad de producción y sus componentes se presenta en la figura III-12A. La emisión de láminas foliares en la planta madre durante la fase de establecimiento se inicia a los 43 DDS, con un LAI de  $0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , con aumento exponencial del área foliar hasta el fin de la fase a los 98 DDS ( $0,47 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ) y luego en la fase de pleno crecimiento vegetativo ocurre un crecimiento constante hasta los 198 DDS, cuando alcanza su máximo LAI de  $2,77 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , declinando lentamente hasta la emergencia de la bellota y luego un descenso acelerado en la etapa productiva. Es importante resaltar que a pesar de las prácticas de deshoje y cirugía, el LAI aumentó a lo largo de la etapa de crecimiento vegetativo de la planta, por la reposición continua de las hojas; otro factor que influye en el LAI es que en los clones de plátano generalmente las últimas tres a cinco hojas en emerger disminuyen progresivamente su tamaño hasta la emergencia de la bellota donde termina la emisión de hojas de la madre (Belalcázar, 1991).

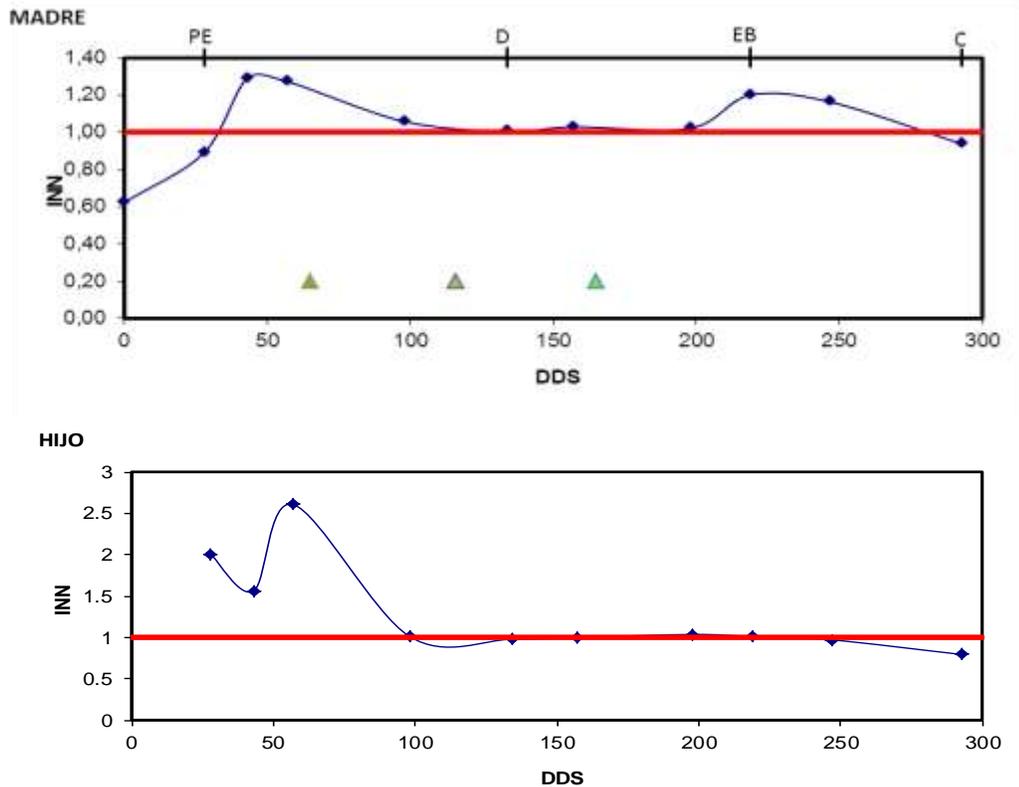


Figura III-11. Índice de nutrición de nitrógeno (INN) de la planta madre e hijo de plátano Hartón. Línea sólida en uno es la condición ideal de nutrición de nitrógeno; rombos datos de campo; triángulos, momentos de la aplicación del fertilizante y en la parte superior estados fenológicos: PE, preemergencia; DF, diferenciación floral; EB, emergencia de la bellota; C, cosecha.

A partir de los 198 DDS, aproximadamente durante la fase de crecimiento vegetativo, se constituye la unidad de producción con el inicio del despliegue de las primeras hojas del hijo. Es importante resaltar que el hijo presentó una curva de crecimiento del índice de área foliar similar a la mostrada por la planta madre durante la fase de establecimiento, alcanzando en este intervalo el valor  $1,31 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , superior al que presentó la planta madre (figura III-12A). Lo que indica que la segunda generación no se retrasa con respecto a la primera por el hecho de encontrarse a la sombra de la misma, muy probablemente por el aporte de asimilados provenientes de la madre.

La cantidad acumulada de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) se presenta en la figura III-12B, la cual alcanza un valor máximo de  $789,93 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  para la unidad de producción, distribuida en  $717,13 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  para la planta madre y  $72,80 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  para el hijo. La radiación interceptada por el hijo es la mitad de la interceptada por la madre cuando presentan un LAI similar, debido a que la madre se desarrolló a plena exposición solar y el hijo bajo el sombreado de la madre.

La eficiencia en el uso de la luz de la unidad de producción (figura III-12C), presenta una curva tipo campana. Durante la etapa de establecimiento, se inicia un rápido aumento hasta los 134 DDS, cuando alcanzó un valor máximo de  $4,86 \text{ g.MJ}^{-1}$ , siendo el momento en que la planta se encuentra en la etapa crecimiento vegetativo, el cual se mantiene hasta los 157 DDS, para iniciar un descenso paulatino que tiende a estabilizarse durante la etapa de floración-fructificación a los 247 DDS, debido posiblemente al aumento del LAI del hijo; además, indica que la planta es más eficiente cuando la mayoría de las hojas están expuestas a la luz solar, pero al cerrar la plantación y al presentar mayor número de hojas sombreadas disminuye la eficiencia, aunado al gasto energético de mantenimiento que es mayor por la acumulación de biomasa.

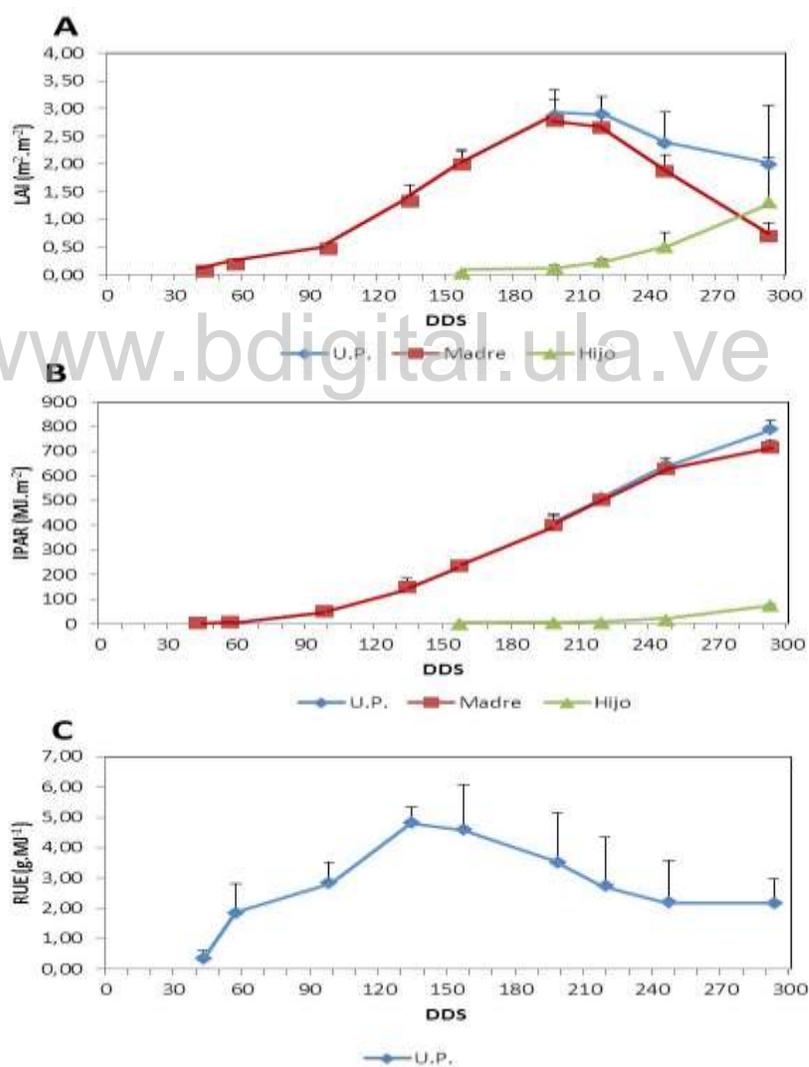


Figura III-12. A: Índice de área foliar (LAI), B: Cantidad acumulada de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) de la unidad de producción (U.P.), la planta madre y el hijo de plátano Hartón, C: Eficiencia del uso de la luz (RUE) de la UP de plátano Hartón.

## **III.2. Balance hídrico del agroecosistema plátano**

### **III.2.1. Dinámica hídrica mensual**

Es importante antes de empezar con la discusión del balance hídrico, indicar que la evapotranspiración utilizada para los cálculos se obtuvo del modelo de simulación (capítulo V) y que el dispositivo instalado para la medición del drenaje en este trabajo, no funcionó como se esperaba. Dado que luego de su instalación y al no obtener lecturas, se realizaron algunas pruebas para determinar su funcionamiento, como la colocación de agua en la superficie y la succión con una aspiradora, sin éxito, por lo que se estableció un monitoreo cada dos días, sin obtener lecturas por un lapso de cinco meses y luego debido a la secuencia de eventos de precipitación ocurridos, donde el nivel freático alcanzó los 70 cm de profundidad e inundando los túneles y calicata de entrada, lo que causó la inestabilidad de las bandejas, en las paredes del túnel y grietas en el área de crecimiento de la planta, que impidió la continuación de la observación de este flujo a lo largo del ciclo de la planta, por tal razón, los valores presentados fueron obtenidos por balance.

En la figura III-13, se observa la dinámica mensual de los diferentes flujos hídricos medidos y calculados durante los 10 meses de desarrollo del cultivo, iniciando en julio 2010 y terminando en abril 2011. La precipitación más alta se obtuvo en el mes de noviembre con 333 mm y la menor en septiembre con un valor ligeramente menor a 100 mm, de los diez meses, siete presentaron lluvias sobre los 200 mm, para un acumulado de 2258 mm en el período que fue superior al promedio anual de la zona entre 1995-2012 (figura II-2).

La figura III-13 A, muestra que el flujo dominante en la precipitación neta es el goteo+caída directa que a su vez sigue el comportamiento de la precipitación total (anexo III-7). Se observa además que el flujo caulinar es una proporción pequeña de la precipitación neta, con máximo de 20% y el mínimo por el orden de 10% (figura III-14) y el goteo+caída directa con máximo de 90% y mínimo de 80%. En la figura III-14, se observa la influencia del área foliar de la planta en estos parámetros, ya que en la medida que aumenta el área foliar, disminuye el goteo+caída directa y aumenta el flujo caulinar que alcanzó durante los meses de enero y febrero (mayor área foliar) el valor más alto. Como se observa en la figura III-15 existe una relación positiva entre el flujo caulinar y el área foliar de la planta.

La intercepción por su parte permanece casi constante a lo largo del período evaluado, cambiando solo por el efecto de la magnitud de los eventos de precipitación. Los valores máximos obtenidos corresponden al 9% de la Pt y los mínimos al 7% (figura III-16), sin encontrarse una relación significativa con respecto al área foliar de la planta.

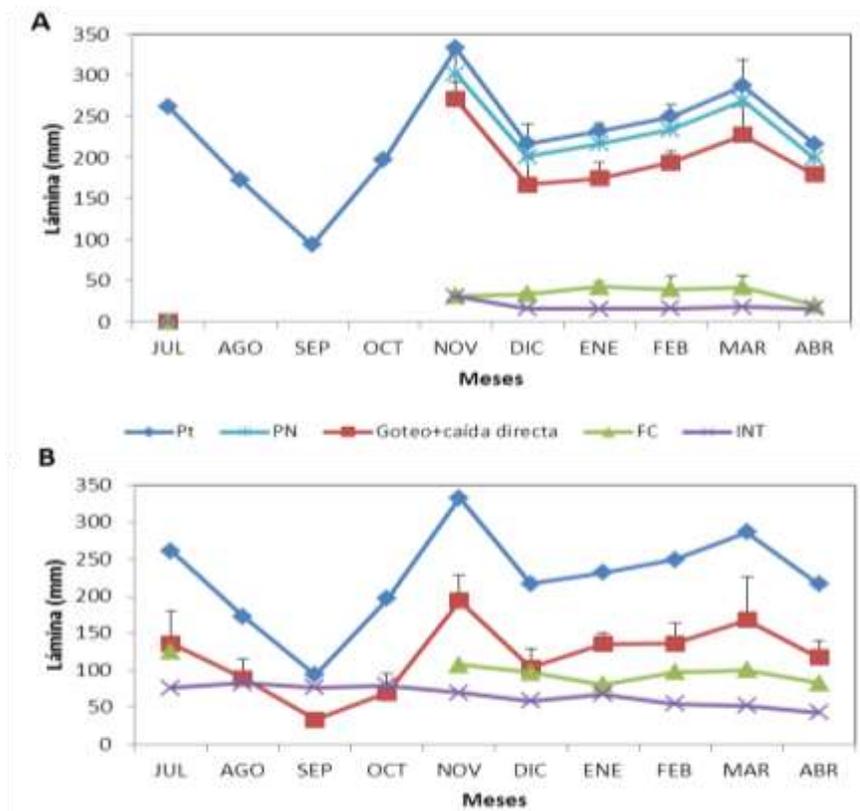


Figura III-13. Dinámica mensual de la precipitación total (Pt), goteo+caída directa, flujo caulinar (FC), precipitación neta (PN), intercepción (INT), escorrentía (Es), infiltración (INF) y evapotranspiración (ET) durante el período de evaluación. El corte en las líneas corresponde a meses no medidos.

En la figura 13B, se muestra como la escorrentía sigue la dinámica de la precipitación. Hay que resaltar la importancia de este flujo, siendo la mayor salida de agua del agroecosistema que representó en todos los meses del período el porcentaje más alto con máximo de 59% y un mínimo de 48% de la Pt (figura III-16), a pesar de la muy baja pendiente de la parcela.

La infiltración siguió un comportamiento poco fluctuante a lo largo del ciclo ya que presentó un valor máximo que alcanzó el 48% y un mínimo de 34% de la Pt (figura III-16), ya que al inicio, cuando el suelo estaba desnudo, presentó un valor alto y luego valores más bajos en la medida que el cultivo aumentó la cobertura foliar y se incrementó la necromasa sobre el suelo producto de las labores de deshoje y deshije, por lo que no se observó una influencia favorable al incremento de la infiltración, situación que se puede explicar por la sumatoria de los efectos de las lluvias principalmente de los eventos de mayor magnitud, la humedad del suelo y la necromasa que pudo favorecer la escorrentía, al sellar el suelo. Por su parte la evapotranspiración se presentó casi constante durante el período considerado (figura III-13B).

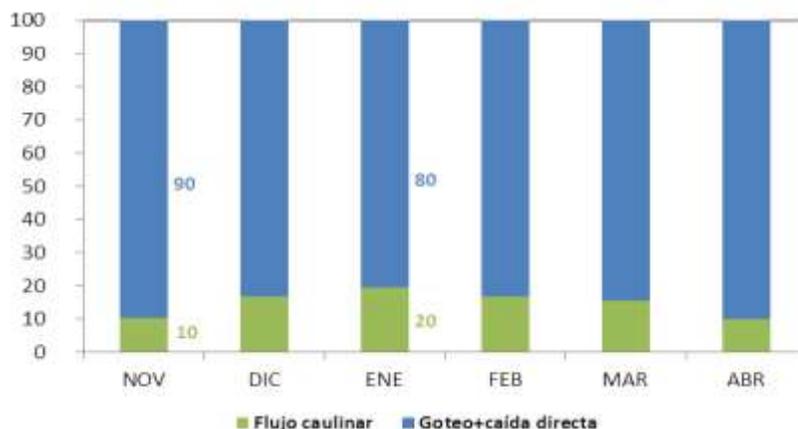


Figura III-14. Proporción de la precipitación neta que se produce por goteo+caída directa y por flujo caulinar en un cultivo de plátano Hartón (*Musa AAB*). Los números en la figura representan el valor máximo y mínimo de cada flujo.

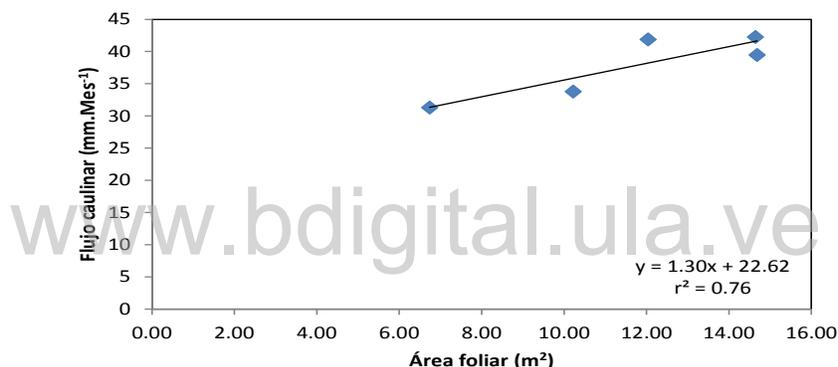


Figura III-15. Relación entre el promedio mensual del área foliar total de la planta de plátano Hartón (m<sup>2</sup>.planta<sup>-1</sup>) y el flujo caulinar mensual.

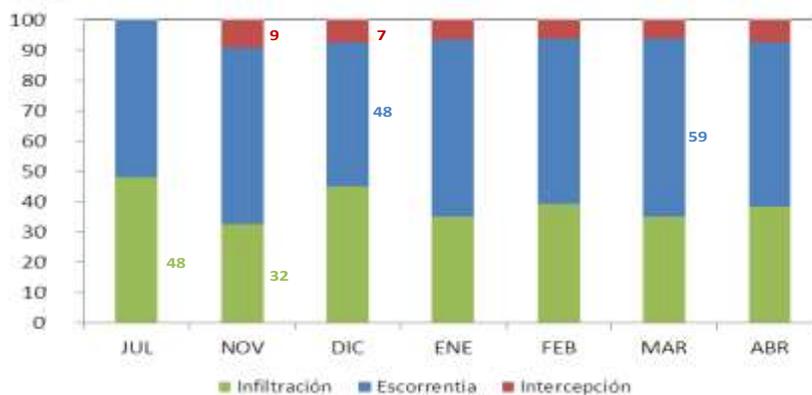


Figura III-16. Porcentaje de lo que sale de la precipitación total del sistema por intercepción y escorrentía o que infiltra en el suelo de un cultivo de plátano Hartón (*Musa AAB*). Los números representan el valor máximo y mínimo de cada flujo.

### III.2.2. Relación entre la precipitación y los flujos considerados

En la figura III-17, se observan las regresiones entre los valores de los flujos de goteo+caída directa, interceptación, flujo caulinar y escorrentía versus la precipitación diaria, observándose que todas se ajustaron a relaciones lineales. La regresión entre los valores de precipitación diaria y el goteo+caída directa resultó significativa ( $p < 0,001$ ,  $n = 119$ ), igualmente para la interceptación que aunque se mostró más dispersa que el resto también presentó una relación significativa ( $p < 0,01$ ,  $n = 119$ ), igual situación ocurrió para el flujo caulinar ( $p < 0,001$ ,  $n = 119$ ) y la escorrentía ( $p < 0,001$ ,  $n = 194$ ).

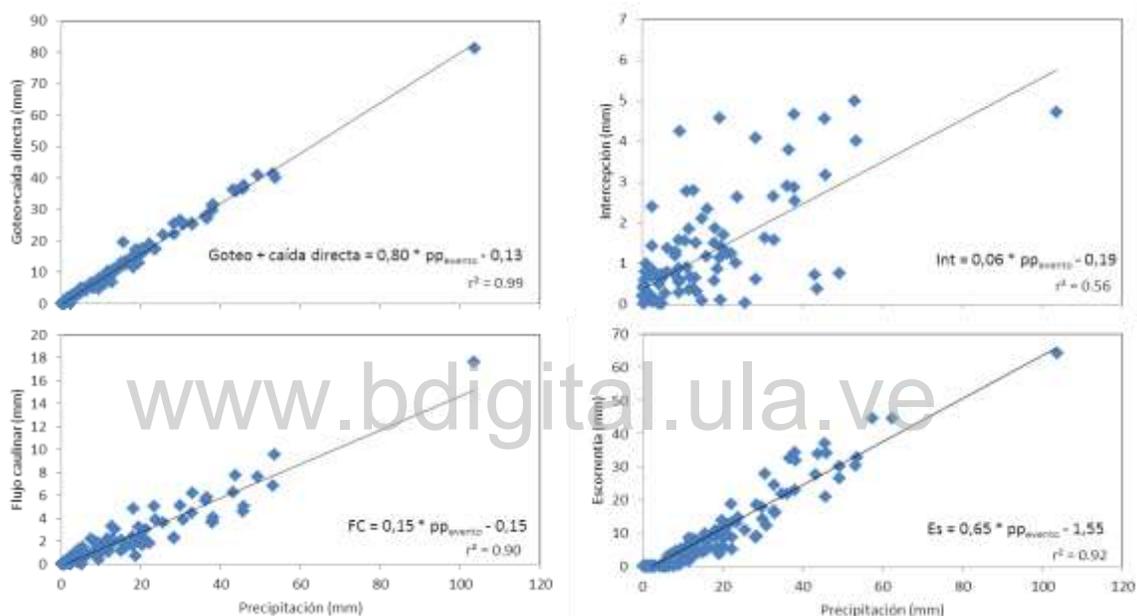


Figura III-17. Flujos de goteo+caída directa, interceptación, caulinar y escorrentía en función de la precipitación diaria en plátano Hartón. La línea representa la regresión lineal de los datos.

En relación a la escorrentía se realizó una regresión lineal múltiple incluyendo además de la magnitud de la precipitación, su intensidad y duración, sin embargo la inclusión de estas otras características de los eventos de lluvia no mejoraron la regresión con respecto a la mostrada en la figura III-17 con la magnitud de la precipitación únicamente, igual ocurrió con los demás flujos.

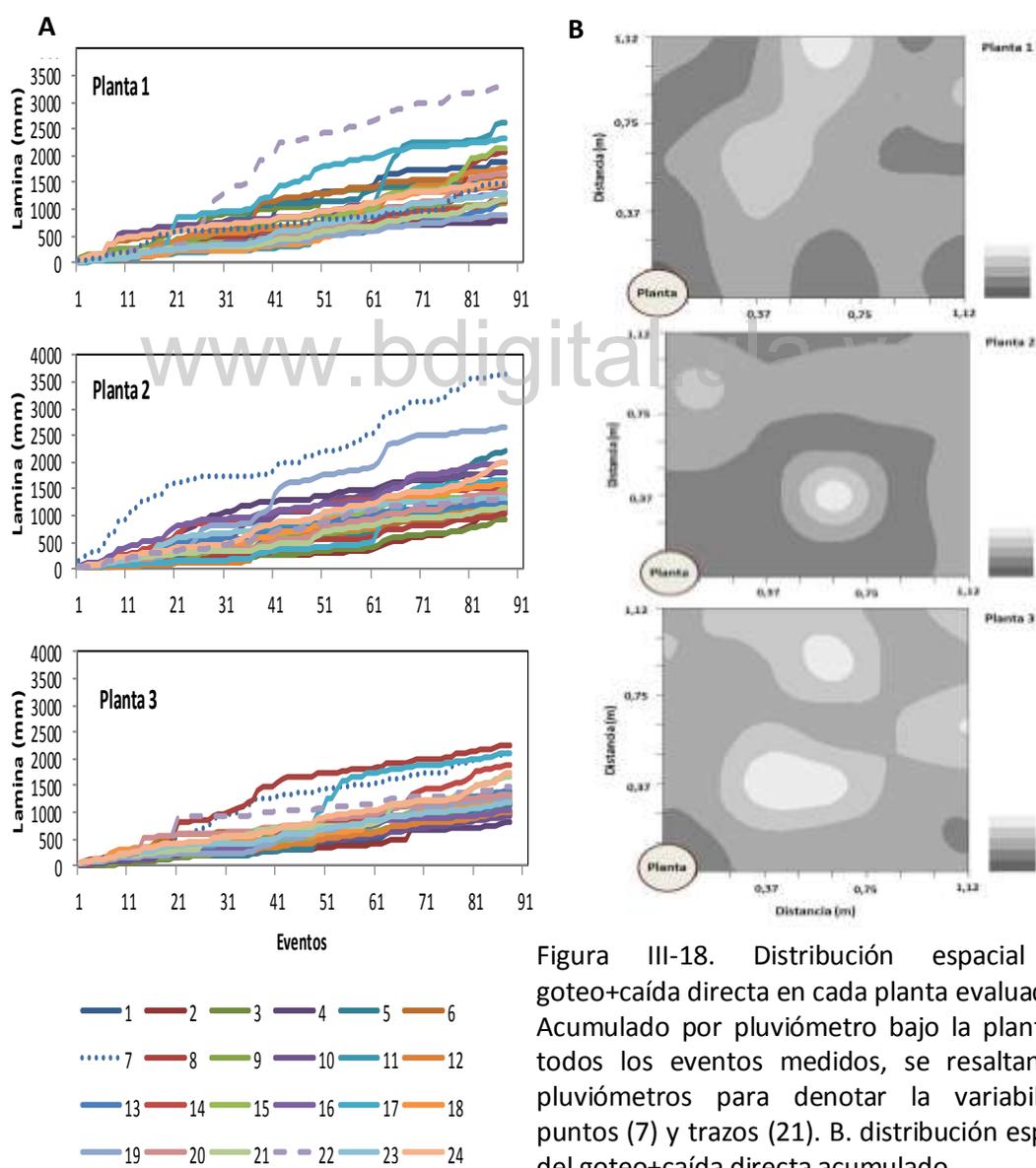
En la figura III-17, también se observa que la interceptación, independientemente de la magnitud de la precipitación, alcanza un tope de alrededor de 4,5 mm cuando se analiza a nivel de eventos. La diferencia en los valores de interceptación entre eventos de similar magnitud puede deberse a la dinámica de la evaporación del agua almacenada en eventos previos. Para este flujo se probaron también relaciones con otras variables como por ejemplo el área foliar pero no se obtuvieron resultados satisfactorios. Empleando los métodos de cálculo de la capacidad de

almacenamiento de las hojas considerados por Jiménez y Lhomme (1994), seleccionando solo los eventos  $\geq 15$  mm por ser suficientes para saturar las hojas y separados mínimo por un día entre eventos previos, se obtuvo para el primer método que consiste en promediar la intercepción de estos eventos, una capacidad de almacenamiento de agua por el follaje de la planta de  $2,86 \pm 1,38$  mm. Un segundo método consisten en graficar la precipitación neta contra la precipitación de los mismos eventos, obteniéndose un intercepto en el eje Y de 1,44 mm, que equivaldría a la retención o capacidad de almacenamiento del dosel, por lo que se puede estimar que la planta puede almacenar entre 1,44 a 4,50 mm, dependiendo principalmente de la magnitud de la precipitación y la separación entre eventos que permita la evaporación del agua almacenada en las axilas de las hojas que es la más persistente.

### **III.2.3. Distribución espacial del flujo de goteo+caída directa**

Con respecto al flujo por goteo+caída directa ya se mencionó que está altamente relacionado con la magnitud de la precipitación total. A continuación se realiza un análisis del efecto del dosel del cultivo sobre la distribución espacial del flujo de goteo+caída directa sobre la superficie del suelo. En la figura III-18, se muestra la acumulación del goteo+caída directa por pluviómetro o posición como se indicó en la figura II-13, para las tres plantas evaluadas. Se observa (figura III-18A) que existe una considerable variabilidad en el agua captada entre los pluviómetros y entre plantas en la misma posición producto de la distribución de las hojas sobre los mismos, resaltan los pluviómetros con los números 7, 17 y 22 con los valores promedios acumulados de las tres plantas  $> 2000$  mm (con valores mayores a 3000 mm en algunos pluviómetros) y los pluviómetros con los números 2, 9 y 4 con valores  $< 1130$  mm (puntualmente se registraron valores menores a 1000 mm), resultados que se aprecian claramente en la figura III-18B, donde se graficó el acumulado final. Puede observarse que existen áreas pequeñas de acumulación del goteo+caída directa con valores altos alrededor del centro del cuadrante y hacia los márgenes exteriores y otras de mayor tamaño pero de menor acumulación básicamente junto a la planta y que bordean áreas con acumulación del goteo+caída directa intermedio a alto, esto puede ocurrir por la forma de arco de las hojas por lo que el agua que es canalizada por la nervadura central se divide en una parte hacia el seudotallo que corre por el flujo caulinar y hacia el ápice que gotea en los márgenes del cuadrante y la forma ondulada de la lámina por efecto del salpique de las gotas de lluvia de una hoja a otra puede actuar acumulando el goteo+caída directa en la parte central del cuadrante.

Considerando la variabilidad entre las plantas y los pluviómetros se decidió efectuar un análisis de distribución espacial por magnitud de los eventos y por área foliar. Para el primer caso se seleccionaron tres rangos de magnitud (5-10 mm, 20-25 mm y 40-45 mm) y el evento de mayor magnitud de precipitación medido (103 mm). En la figura III-19, se observa que el dosel causa una redistribución de la lluvia sobre el terreno con un patrón similar entre los diferentes rangos de magnitud presentando áreas pequeñas bien definidas de mayor acumulación del goteo+caída directa alrededor de 0,37 m desde elseudotallo y otra área similar cerca del margen de la parcela y áreas de mayor tamaño con cantidades de goteo+caída directa intermedia distribuidas de forma irregular en toda la superficie.



Como se obtuvo igualmente un patrón similar de distribución del goteo+caída directa en los diferentes rangos mostrados anteriormente, se efectuó para el segundo caso una comparación entre dos áreas foliares contrastantes, seleccionando 3 y 14 m<sup>2</sup> por presentar un mínimo de dos eventos, los resultados se muestran en la figura III-20, donde se observa que independientemente del área foliar se mantiene el patrón de acumulación del goteo+caída directa en pequeñas áreas cerca delseudotallo (0,37 m). En los dos primeros rangos, en el área de 3 m<sup>2</sup> se presentan áreas con poca concentración de goteo+caída directa que pareciera contradictorio ya que hay menor área foliar en comparación a 14 m<sup>2</sup> donde estas áreas con poco goteo+caída directa son muy pequeñas; en el rango de 15 a 20 mm, la distribución del goteo+caída directa es similar entre las dos áreas foliares lo que podría indicar que a medida que incrementa la magnitud de la lluvia el efecto del área foliar se equilibra. En base a los resultados obtenidos en las tres formas de análisis del goteo+caída directa realizadas, se puede indicar que la acumulación por pluviómetro es adecuada para determinar la distribución espacial del goteo+caída directa en el agroecosistema plátano.

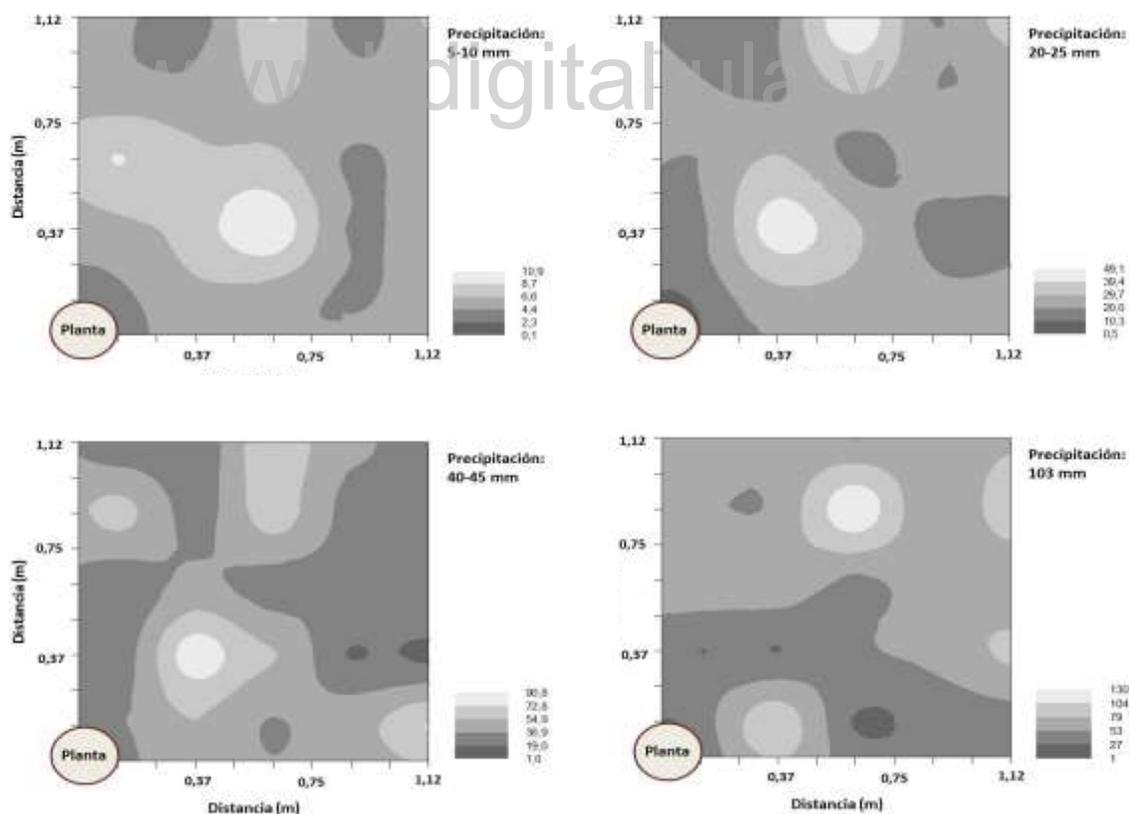


Figura III-19. Distribución del flujo de goteo+caída directa (mm) en cuatro magnitudes de precipitación en el cultivo del plátano Hartón.

La importante heterogeneidad espacial de la precipitación neta causada por efecto del dosel puede tener importantes consecuencias ecológicas para el agroecosistema ya que se traducirá en áreas más secas y húmedas en el suelo, que favorecerán localmente procesos como la desnitrificación o el lavado de nutrientes.

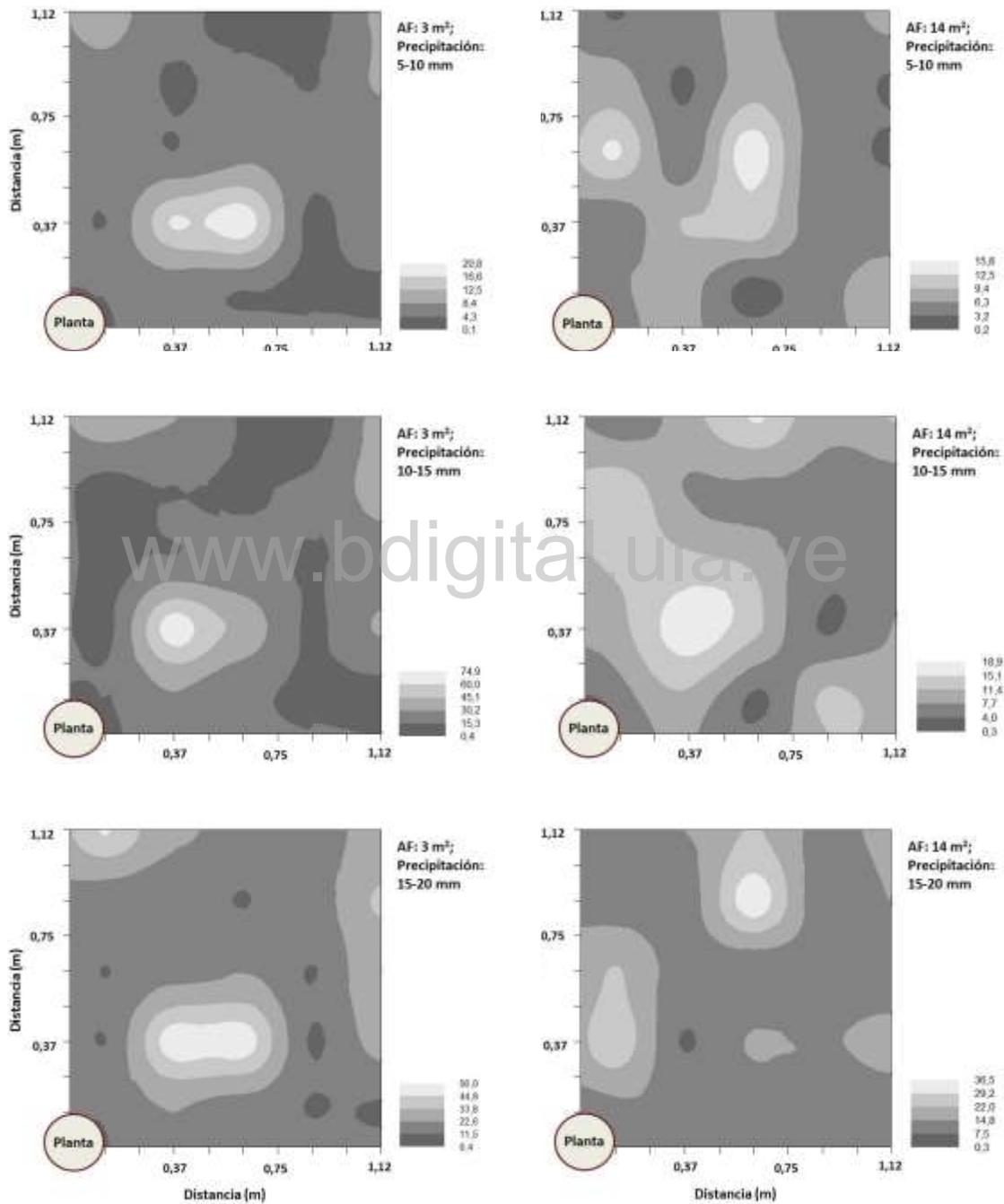


Figura III-20. Distribución del flujo de goteo+caída directa (mm) en dos tamaños de área foliar (AF) y tres magnitudes de precipitación.

### III.2.4. Agua almacenada en el suelo

En la figura III-21 y anexo III-8, se muestra la fluctuación de la lámina de agua almacenada en el suelo en las capas consideradas, se observa que independiente de la lluvia acumulada en cada período, la lámina de agua en la capa de 0-20 cm permaneció prácticamente constante, no presentando diferencias significativas entre los muestreos, igualmente sucedió en la capa de 20-50 cm, presentando ambas capas valores por encima de 50 mm, niveles cercanos a la capacidad de campo del suelo, con tendencia a superarla hacia el final del ciclo en la capa de 20 a 50 cm, por lo tanto es de suponer que la planta no presentó problemas de falta de agua durante el ciclo.

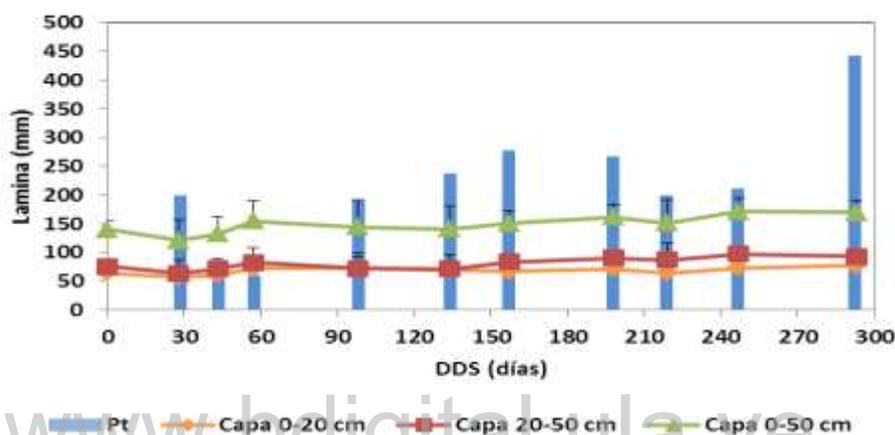


Figura III-21. Agua almacenada en el suelo (mm) y precipitación acumulada entre dos muestreos consecutivos (mm).

Dada la dinámica de la precipitación y del agua almacenada en el suelo se pudiera pensar que en períodos con eventos de lluvia consecutivos, que se tradujo en dos oportunidades en inundaciones repentinas de la zona, aunque no ocurrió en la parcela experimental y si consideramos otras posibles entradas de agua no medidas, como el nivel freático, que afectaría el movimiento del agua, se puede pensar que en breves períodos pudo ocurrir la saturación del perfil del suelo, que no provocó efectos negativos en las plantas, podría influir en procesos del suelo.

### III.2.5. Balance hídrico del período estudiado

El balance hídrico del agroecosistema, consolidado en las principales etapas fenológicas del cultivo se presenta en la figura III-22. En la fase de establecimiento, desde los 0 a 134 DDS, los principales flujos de salida fueron la escorrentía y la evaporación, con 45% cada uno, el drenaje con el 9% y la interceptación con 1% de la precipitación total, la precipitación neta representó el 99% (goteo+caída directa 98% y flujo caulinar 1%), la infiltración alcanzó el 53% y el suelo no presentó variación del contenido de agua (anexo III-8).

En la figura III-22, se muestran los balances de los períodos 134 a 219 DDS (desde la diferenciación floral a la emergencia de la bellota) y de 219 a 293 DDS (desde la emergencia de la bellota a la cosecha), en general se mantuvo la misma tendencia sin importar el período de desarrollo del cultivo con pequeñas variaciones donde la escorrentía fue el mayor flujo de salida seguido por la evapotranspiración, luego el drenaje y la intercepción. En la misma figura se presenta también el balance general de 0 a 293 DDS, donde la escorrentía es el principal flujo de salida con el 52% de la precipitación total seguida por la evapotranspiración (30%), el drenaje (12%) y por último la intercepción (5%), en el suelo se presentó una variación positiva de apenas 1%, con una precipitación neta, que representa el 95% de la precipitación total. La alta escorrentía que se experimenta se puede explicar por el mantenimiento de los niveles de humedad del suelo cercanos a capacidad de campo que pueden limitar la entrada de agua al suelo y que se potencia por la acumulación de la precipitación en áreas pequeñas que pudiera favorecer este flujo de salida y que además como ocurren principalmente en la franja de fertilización pueden potenciar las pérdidas del fertilizante aplicado superficialmente.

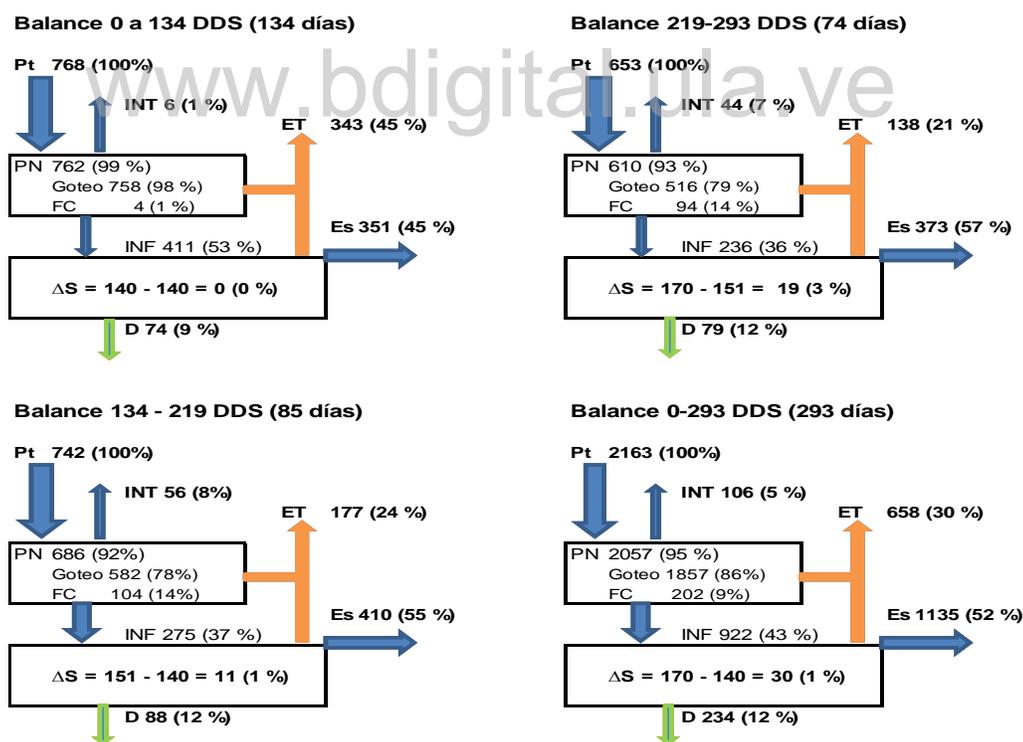


Figura III-22. Balances hídricos del agrosistema plátano durante las etapas de crecimiento vegetativo (0-134 DDS), reproductiva (134-219 DDS), productiva (219-293 DDS) y ciclo total (0-293 DDS), valores en mm. Pt: precipitación total; INT: intercepción; ET: evapotranspiración; PN: precipitación neta; FC: flujo caulinar; INF: infiltración; Es: escorrentía; ΔS: Almacenamiento del suelo; D: drenaje. La ET se calculó con el modelo de simulación y el D por balance.

### III.3. Flujos y balance de nitrógeno

#### III.3.1. Dinámica del nitrógeno mineral del suelo

La dinámica del nitrógeno mineral, amonio y nitrato, en las dos capas de suelo y en la capa total se observa en la figura III-23, donde se muestra que la principal forma de nitrógeno presente en el suelo es el nitrato, el cual presenta una mayor concentración en la primera capa en comparación a la segunda. El nitrato en ambas capas varía muy poco entre la siembra y los 43 DDS, (figura III-31), para luego decrecer hasta los 98 DDS como consecuencia probable de la inmovilización (figura III-31). No se detectó un efecto de la aplicación de la primera dosis de fertilización (65 DDS) sobre el nitrógeno mineral del suelo, lo cual pudo haber ocurrido por efecto de la inmovilización, la absorción por la planta y las pérdidas por volatilización natural y del fertilizante. Por el contrario, el efecto de la segunda fertilización, realizada a los 116 DDS, si produjo un aumento del nitrógeno mineral, que ya a los 134 DDS se encontraba principalmente en forma de nitrato en la capa de 0 a 20, para descender nuevamente a los 157 DDS y un nuevo aumento con menor intensidad en el muestreo efectuado a los 198 DDS debido a la tercera aplicación de fertilizante realizada a los 165 DDS, para disminuir progresivamente hasta la cosecha en los 293 DDS. Llama la atención la nitrificación rápida del nitrógeno, considerando que la fertilización fue aplicada en forma de urea, la cual libera rápidamente amonio, el cual se transforma en nitrato por acción de los organismos nitrificantes. Esta nitrificación puede hacer que el nitrógeno esté más susceptible de perderse, sea por desnitrificación (proceso no evaluado) o por drenaje. Sin embargo, no se detectó un aumento importante de nitrato en la capa más profunda evaluada, lo que indicaría que el movimiento descendente no es tan rápido.

Con respecto al amonio se presentó más estable en sus valores, sin embargo presentó ligeros incrementos de forma similar a la dinámica del nitrato por efecto de la aplicación del fertilizante en la profundidad de 0 a 20 cm y como se pudiera esperar en la segunda capa no se obtuvo cambios en el contenido de amonio por ser una forma menos móvil (figura III-23).

Los nitratos en la profundidad de 20 a 50 cm (figura III-23), presentan una situación un poco diferente ya que después de los 43 DDS, disminuye progresivamente hasta los 134 DDS, posiblemente producto de la baja lixiviación del nitrato y el inicio de la exploración en esta capa por el sistema radicular del cultivo, ya que durante este período no se detectó drenaje en los dispositivos instalados para tal fin, luego después de la tercera aplicación de fertilizante se produce un aumento del contenido de nitrato, posiblemente por la movilización del nitrato y que al igual como sucedió en los últimos dos muestreos de la capa superficial, disminuye el contenido

de nitratos y amonio. Este comportamiento del nitrato en la segunda capa refuerza la idea de que el movimiento interno del agua es lento. Llama la atención que las pérdidas por drenaje del N (estimadas de los resultados del modelo, suponiendo que la concentración de N de la segunda capa era igual a la concentración de la solución del suelo como se muestra en el capítulo V), en estos suelos no son pequeñas contrario a lo esperado, así mismo también nos indica que el proceso de nitrificación fue activo ya que en las dos capas el amonio se presentó con valores bajos en todo el ciclo (figura III-23).

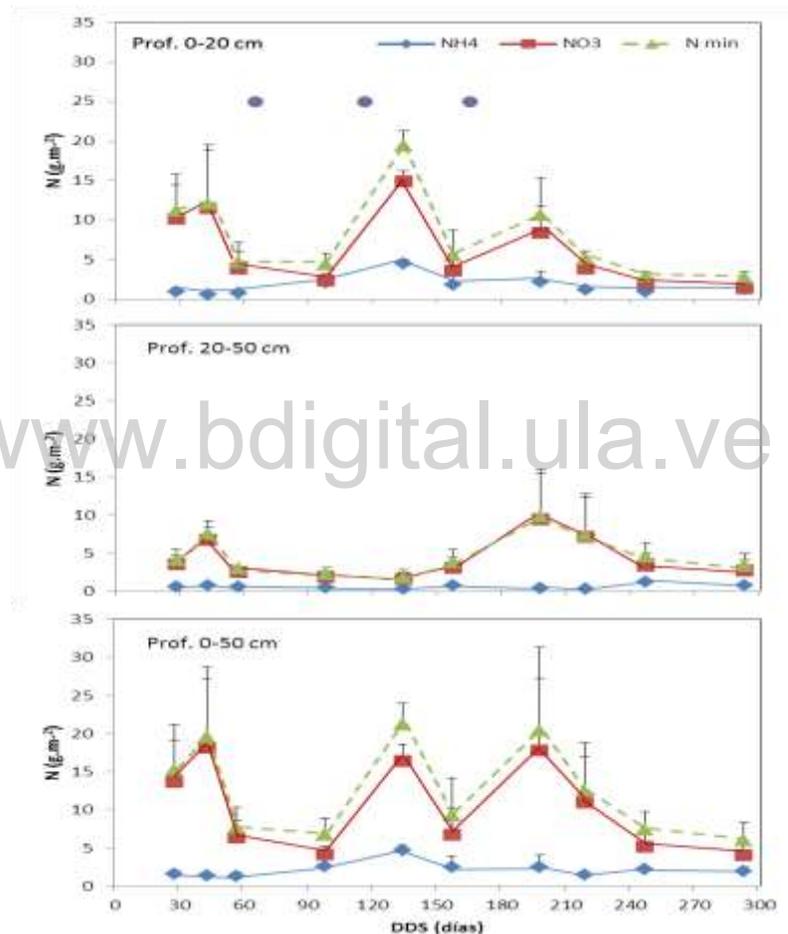


Figura III-23. Nitrógeno mineral total, amonio y nitrato en g.m<sup>-2</sup> del suelo en la plantación de plátano Hartón en las profundidades de 0-20 cm, 20-50 cm y 0-50 cm. Barras negras representa la desviación estándar positiva y los puntos los momentos de aplicación del fertilizante al suelo.

### III.3.2. Dinámica del nitrógeno en los flujos hídricos

La tabla III-19, nos muestra las concentraciones promedio de las formas de nitrógeno en los diferentes flujos de agua medidos en todo el ciclo, observándose que la forma predominante en el agua de precipitación, goteo+caída directa y flujo caulinar fue el amonio. La presencia de

amonio en el agua de lluvia puede ser debida a varios factores como la influencia del Lago de Maracaibo y la actividad agropecuaria de la zona que provocan pérdidas gaseosas de nitrógeno en forma de amoníaco. Por el contrario, en el agua de escorrentía la forma predominante fue el nitrato, que como se indicó anteriormente es la forma predominante en el suelo. Las concentraciones entre los diferentes flujos de agua presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), para el amonio, el flujo caulinar presentó el valor menor que fue diferente al goteo+caída directa con el valor mayor, la precipitación y la escorrentía se presentaron como valores intermedios sin diferencias significativas entre estos y el goteo+caída directa y el flujo caulinar. Para el caso del nitrato también se presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) pero se formaron grupos definidos uno por la precipitación, goteo+caída directa y flujo caulinar con los valores bajos y el otro por la escorrentía con el valor mayor, la suma de estas formas de nitrógeno sigue el comportamiento del nitrato.

Formas de N	Flujo			
	Pt	Goteo	FC	Es
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>0,43</b> 0,12 ab	<b>0,49</b> 0,18 b	<b>0,37</b> 0,17 a	<b>0,39</b> 0,13 ab
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,14</b> 0,05 a	<b>0,23</b> 0,07 a	<b>0,25</b> 0,08 a	<b>0,71</b> 0,33 b
Nmin	<b>0,57</b> 0,16 a	<b>0,71</b> 0,23 a	<b>0,62</b> 0,23 a	<b>1,09</b> 0,41 b

Tabla III-19. Concentración de nitrógeno ( $\text{mgN.l}^{-1}$ ) en los flujos de precipitación (Pt), goteo+caída directa, flujo caulinar (FC) y escorrentía (Es). Valores promedios de todo el ciclo. Valores pequeños representan la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas a  $p < 0,05$ .

Las concentraciones mensuales de las diferentes formas de nitrógeno en los flujos hídricos se presentan en la figura III-24. Los diferentes flujos presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en el tiempo y por forma de nitrógeno, a excepción del goteo+caída directa y flujo caulinar para el nitrato (anexo III-6). En la precipitación total, la concentración del amonio osciló entre 0,23 a 0,57  $\text{mgN.l}^{-1}$ , el nitrato de 0,03 a 0,19  $\text{mgN.l}^{-1}$ , en el goteo+caída directa osciló el amonio entre 0,22 a 0,74  $\text{mgN.l}^{-1}$  y el nitrato de 0,16 a 0,29  $\text{mgN.l}^{-1}$ , con respecto al flujo caulinar el contenido de amonio fluctuó entre 0,18 y 0,60  $\text{mgN.l}^{-1}$  y el nitrato entre 0,17 y 0,31  $\text{mgN.l}^{-1}$  y la escorrentía presenta valores para el amonio que oscilaron de 0,25 a 1,31 y para nitrato fueron más altos siempre entre 0,43 y 4,54  $\text{mgN.l}^{-1}$ , los valores altos coincidieron con los períodos siguientes a los momentos de aplicación de fertilizante.

Con respecto al goteo+caída directa y flujo caulinar a pesar que su concentración para el caso del primero fue mayor que la concentración de la precipitación casi siempre estas experimentaron una dinámica similar a la mostrada por la precipitación, por el contrario las fluctuaciones en la concentración de la escorrentía se debieron a las aplicaciones de fertilizante con mayor efecto sobre el nitrato que sobre el amonio. Es de resaltar en general que los flujos hídricos en el tiempo, presentaron las concentraciones de amonio mayores que las de nitrato a excepción de la escorrentía que fue al contrario posiblemente por el predominio del nitrato en el suelo y las aplicaciones de fertilizante que sufre una rápida nitrificación y causan un incremento de esta forma de nitrógeno.

No se encontró una relación entre el volumen de precipitación mensual y la concentración mensual de amonio y nitrato de la precipitación, goteo+caída directa y el amonio del flujo caulinar. A diferencia, si se presentó una relación entre la precipitación mensual y la concentración de nitrato del flujo caulinar y ambas concentraciones de las formas de nitrógeno para la escorrentía, que como era de esperar por un efecto de dilución, siguen un patrón inverso, es decir a mayor precipitación menor es la concentración de las formas de nitrógeno en estos flujos (figura III-25).

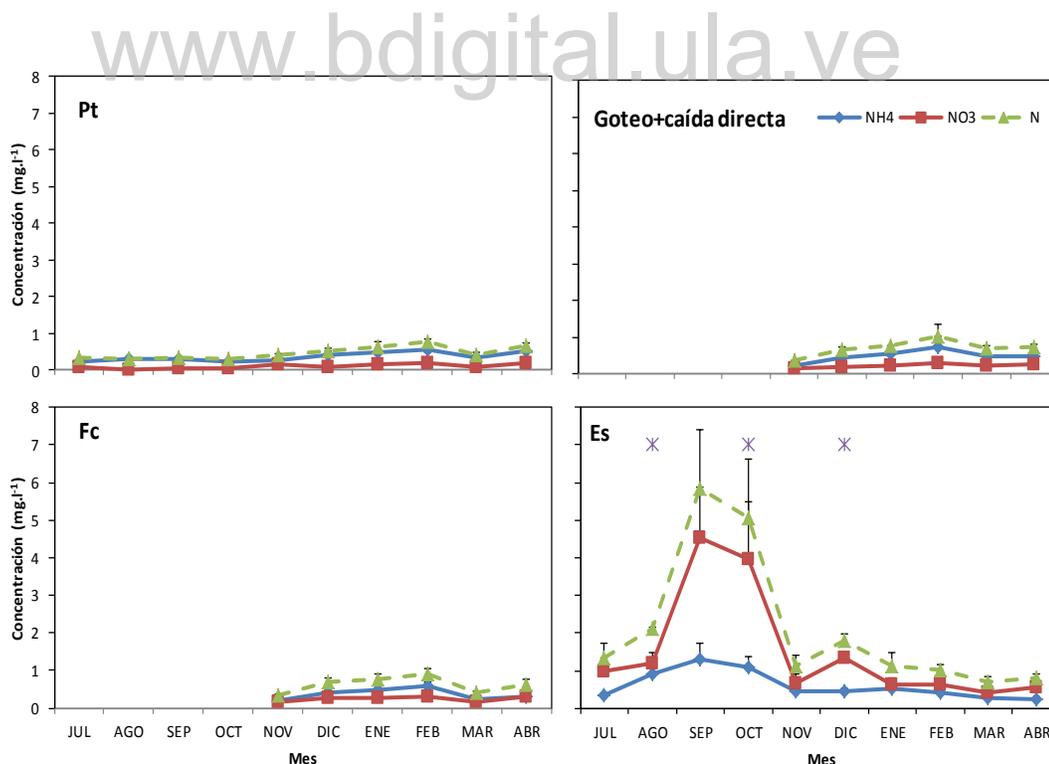


Figura III-24. Concentración de las formas de nitrógeno mensual en la precipitación total (Pt), goteo+caída directa, flujo caulinar (Fc), escorrentía (Es). Durante los primeros meses no se midió goteo+caída directa y Fc por estar el cultivo poco desarrollado. Los asteriscos en Es representan los momentos de la fertilización.

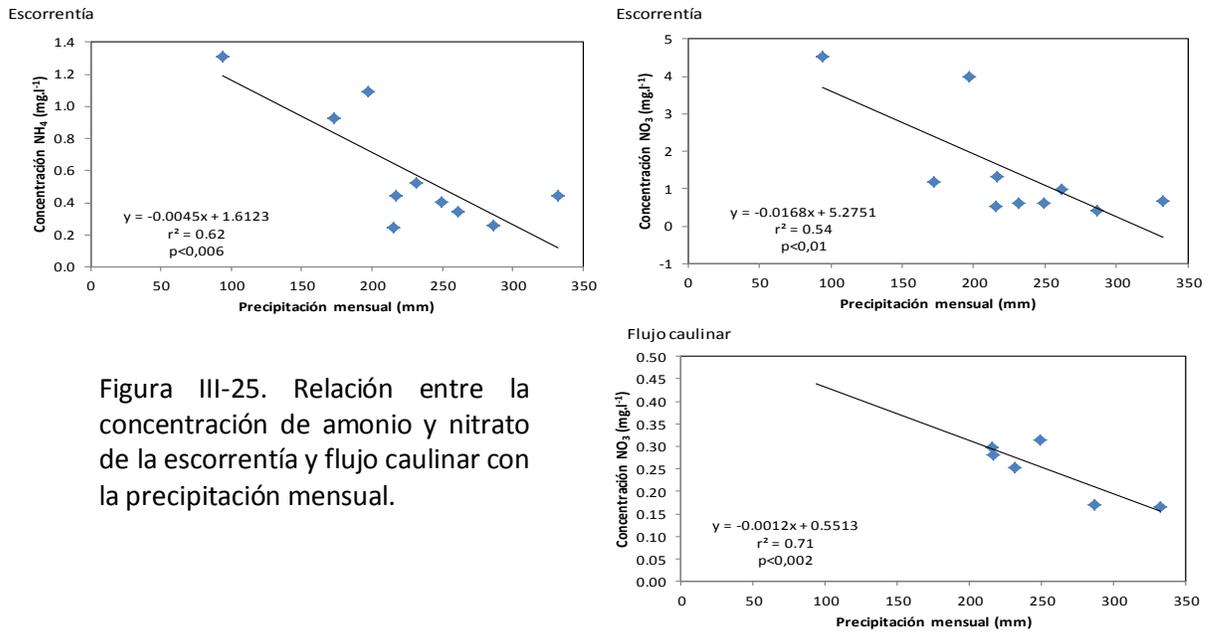


Figura III-25. Relación entre la concentración de amonio y nitrato de la escorrentía y flujo caulinar con la precipitación mensual.

En la tabla III-20, se muestran los resultados de nitrógeno en  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  en los flujos medidos por mes, donde se observa que la precipitación representa una entrada baja en los primeros cuatro meses del ciclo y luego, posiblemente en parte por la volatilización de las aplicaciones de fertilizante, aumentó con poca fluctuación alrededor de  $0,14 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mes}^{-1}$ . Se puede considerar que es un flujo de nitrógeno importante, ya que alcanzó un valor total a lo largo de los 10 meses de  $1,02 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  y compensa en parte la pérdida por escorrentía por el orden de  $1,81 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . La precipitación neta alcanzó los  $0,97 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  en los seis meses medidos, con cuatro de los seis meses con valores superiores a la precipitación, indicando que el agua se concentra por el pluviolavado de nitrógeno en su paso a través de las hojas y elseudotallo. Este flujo de pluviolavado representó el 11% del nitrógeno contenido en la precipitación neta (tabla III-20) en cuatro de los meses medidos. Entre el goteo+caída directa y el flujo caulinar el mayor aporte al pluviolavado está representado por el goteo+caída directa, producto del mayor volumen que se distribuye por esta vía, ya que la concentración de nitrógeno entre ellos es similar.

Con respecto a la escorrentía, se observa que hay cierta relación entre la práctica de fertilización y el incremento de nitrógeno que se pierde por este flujo en los meses que hubo aplicaciones. El nitrato como se indicó anteriormente, es la forma de nitrógeno que sale principalmente por esta vía. En los dos muestreos finales se presentó un flujo negativo que indica que el nitrógeno perdido por escorrentía fue menor al que llegó al suelo por precipitación neta, obteniendo al final que el 54% del nitrógeno perdido, posiblemente provenga de la precipitación neta y el restante del suelo y/o del fertilizante (tabla III-20).

Tabla III-20. Nitrógeno ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), en la precipitación total (Pt), goteo+caída directa, flujo caulinar (FC), precipitación neta (PN) y escorrentía (Es) del período total de la evaluación y acumulado en los diferentes períodos presentados en días después de la siembra (DDS).ND: corresponden a meses no medidos, sue: suelo, fer: fertilizante.

Flujo	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
Pt	0,09	0,05	0,03	0,06	0,14	0,11	0,15	0,19	0,12	0,15	1,09
Goteo	0,00	ND	ND	ND	0,10	0,11	0,14	0,20	0,16	0,13	0,84
FC	0,00	ND	ND	ND	0,01	0,02	0,03	0,04	0,02	0,01	0,13
PN	0,09	ND	ND	ND	0,11	0,13	0,17	0,24	0,18	0,14	0,97
Es	0,18	0,19	0,19	0,35	0,22	0,17	0,15	0,14	0,12	0,09	1,81
Pluviolavado	0,00	ND	ND	ND	-0,03	0,02	0,02	0,05	0,06	-0,01	0,11
Es sue y/o fer	0,18	0,19	0,19	0,35	0,11	0,05	-0,02	-0,10	-0,06	-0,05	0,84

Pluviolavado: se determinó por la diferencia entre la precipitación neta y la precipitación total; Es sue y/o fer: se determinó por la diferencia entre la escorrentía y la precipitación neta.

### III.3.3. Pérdidas de nitrógeno por erosión

En la tabla III-21 se presentan los resultados mensuales del sedimento grueso, fino y total y del nitrógeno total (orgánico + mineral) que contienen, medido en las parcelas de erosión. Los sedimentos grueso y fino, fueron influenciados directamente por los eventos de precipitación y el sedimento total se ajustó a la ecuación de regresión (figura III-26):

$$\text{Sedimento} = 0,3602 * pp_{\text{evento}} - 1,9015, (p < 0,0001, n = 92)$$

El valor total de pérdida de sedimentos por erosión durante el ciclo fue de  $558,20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , donde los meses de septiembre y octubre presentaron los valores más bajos y el resto por encima de  $40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , con un máximo de  $91,9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  en el mes de noviembre. La pérdida total de suelo corresponde a un valor moderado, ya que son para un período menor de un año y equivalen a más de  $5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , o a la pérdida de  $0,03 \text{ cm}$  de suelo en este período.

Con respecto al nitrógeno en dichos sedimentos (tabla III-21), la concentración es bastante constante con un promedio de  $0,45 \pm 0,06\%$ , por lo tanto las pérdidas de N siguen el mismo comportamiento que las de sedimentos (tabla III-21). Las pérdidas totales de nitrógeno por este vía fueron de  $2,46 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , aportando el sedimento grueso el 60% de la pérdida.

Tabla III-21. Distribución mensual de las pérdidas de suelo y nitrógeno en el sedimento grueso y fino, medido en las parcelas de erosión.

Variable	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	Total
<b>SG</b>	<b>42.80</b>	<b>37.00</b>	<b>8.80</b>	<b>25.30</b>	<b>47.90</b>	<b>28.30</b>	<b>34.50</b>	<b>27.60</b>	<b>37.30</b>	<b>44.60</b>	<b>334.10</b>
	19.48	19.84	4.31	9.68	22.74	10.89	4.59	19.46	30.69	12.93	154.60
<b>SF</b> $\text{g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$	<b>29.80</b>	<b>21.30</b>	<b>6.60</b>	<b>7.70</b>	<b>44.00</b>	<b>14.70</b>	<b>35.10</b>	<b>17.30</b>	<b>30.70</b>	<b>16.80</b>	<b>224.00</b>
	19.30	16.58	7.06	3.84	9.87	5.68	8.60	5.13	9.66	5.32	91.03
<b>Total</b>	<b>72.60</b>	<b>58.30</b>	<b>15.40</b>	<b>33.00</b>	<b>91.90</b>	<b>43.00</b>	<b>69.60</b>	<b>44.90</b>	<b>68.10</b>	<b>61.40</b>	<b>558.20</b>
	38.77	36.41	11.37	13.51	32.62	16.57	13.18	24.58	40.35	18.25	245.63
<b>N</b> %	<b>0.53</b>	<b>0.49</b>	<b>0.54</b>	<b>0.55</b>	<b>0.45</b>	<b>0.43</b>	<b>0.39</b>	<b>0.34</b>	<b>0.39</b>	<b>0.39</b>	<b>0.45</b>
	0.09	0.06	0.10	0.11	0.02	0.02	0.04	0.02	0.06	0.08	0.06
<b>N-SG</b>	<b>0.23</b>	<b>0.18</b>	<b>0.05</b>	<b>0.14</b>	<b>0.22</b>	<b>0.12</b>	<b>0.13</b>	<b>0.09</b>	<b>0.15</b>	<b>0.17</b>	<b>1.48</b>
	0.10	0.10	0.02	0.05	0.10	0.05	0.02	0.07	0.12	0.05	0.69
<b>N-SF</b> $\text{g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$	<b>0.16</b>	<b>0.10</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>0.20</b>	<b>0.06</b>	<b>0.14</b>	<b>0.06</b>	<b>0.12</b>	<b>0.07</b>	<b>0.99</b>
	0.10	0.08	0.04	0.02	0.04	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.42
<b>N-Total</b>	<b>0.38</b>	<b>0.28</b>	<b>0.08</b>	<b>0.18</b>	<b>0.42</b>	<b>0.18</b>	<b>0.27</b>	<b>0.15</b>	<b>0.27</b>	<b>0.24</b>	<b>2.46</b>
	0.21	0.18	0.06	0.07	0.15	0.07	0.05	0.09	0.16	0.07	1.11

SG: Sedimento grueso; SF: Sedimento fino; N: Nitrógeno; los números pequeños a la izquierda representan la desviación estándar.

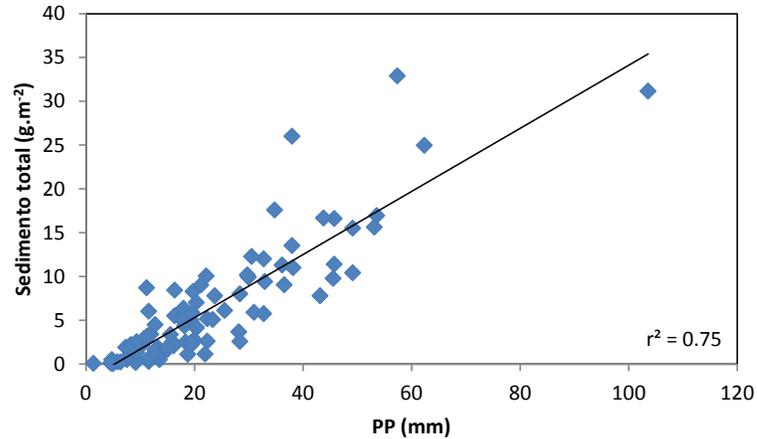


Figura III-26. Relación de los sedimentos totales y la precipitación diaria.

La pérdida de suelo por erosión fue correlacionada con el agua de escorrentía medida en las parcelas por evento, obteniéndose (figura III-27) un buen ajuste lineal con la ecuación:

$$\text{Sedimento} = 0,5077 * E_{\text{evento}} - 0,1497, (p = 0,0001, n = 92)$$

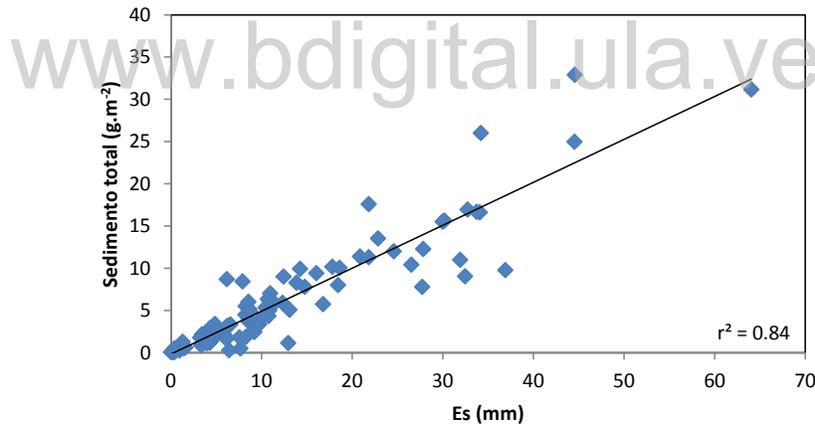


Figura III-27. Relación de la pérdida de suelo (Sedimento) y la escorrentía diaria.

La cantidad de sedimento y nitrógeno que sale del agroecosistema y que puede ser potencialmente contaminante, medido durante los 10 meses del ciclo del cultivo, para sedimento grueso fue de  $3,3 \text{ Mg.ha}^{-1}$  y  $14,8 \text{ kgN.ha}^{-1}$  y el sedimento fino y el nitrógeno contenido en él y en el agua, que pueden llegar al Lago de Maracaibo, midiendo valores de  $2,2 \text{ Mg.ha}^{-1}$  y  $9,9 \text{ kgN.ha}^{-1}$  y en el agua de escorrentía  $17,8 \text{ kgN.ha}^{-1}$ , para un total de  $42,5 \text{ kgN.ha}^{-1}$ . Si asumimos que está información es representativa y se proyecta a las 35 mil hectáreas sembradas de plátano en la región, se podría estar hablando de aproximadamente 969,5 MgN que se estaría aportando para

el proceso de eutrofización del Lago de Maracaibo, por esta actividad agrícola platanera de la región, que equivale a una cantidad de más de 40.000 sacos de urea para un ciclo de producción, bajo las características pluviométricas evaluadas.

### III.3.4. Pérdidas de nitrógeno por volatilización

Los resultados del experimento de volatilización de la urea aplicada en la superficie del suelo se presentan en la tabla III-22, donde se observa que las mayores pérdidas ocurren durante los primeros cuatro días posteriores a la fertilización, cuando se volatiliza alrededor del 7,7% del total aplicado ( $13,2 \text{ gN.m}^{-2}$ ) en cada aplicación y progresivamente disminuye hasta los 20 días en promedio, cuando se iguala con la volatilización de nitrógeno del suelo sin fertilizante. Los valores acumulados de las pérdidas por aplicación fueron de  $2,08 \text{ gN.m}^{-2}$  en la primera, un máximo de  $2,15 \text{ gN.m}^{-2}$  en la segunda aplicación y nuevamente  $2,08$  en la tercera aplicación, que representan el 16,3 y 15,8% respectivamente del nitrógeno aplicado por fertilización. Considerando las condiciones predisponentes para esta pérdida como el pH, humedad del suelo, temperatura, textura, no se observó un efecto positivo por la mayor cobertura del cultivo que podría disminuir la temperatura del suelo en comparación a la primera aplicación en la cual el cultivo estaba pequeño y gran parte del terreno estaba descubierto, por lo tanto posiblemente la forma de aplicación superficial y la humedad del suelo favorecen este proceso bajo las condiciones del estudio.

Tabla III-22. Cantidad de nitrógeno del fertilizante volatilizado ( $\text{gN.m}^{-2}$ ) durante las tres aplicaciones de fertilizante nitrogenado (urea) en dosis de  $13,17 \text{ gN.m}^{-2}.\text{aplicación}^{-1}$ . Aplicación 1- 28/08/2010; 2- 18/10/2010 y 3- 06/12/2010. Valores pequeños debajo de los valores en negrillas representan la desviación estándar.

Aplicación	Días Después de la Aplicación del Fertilizante Nitrogenado											Total
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
1	<b>0.50</b>	<b>0.48</b>	<b>0.35</b>	<b>0.31</b>	<b>0.17</b>	<b>0.11</b>	<b>0.07</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>0.01</b>		<b>2.08</b>
	0.22	0.05	0.01	0.03	0.06	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01		0.48
2	<b>0.59</b>	<b>0.52</b>	<b>0.35</b>	<b>0.29</b>	<b>0.18</b>	<b>0.08</b>	<b>0.08</b>	<b>0.04</b>	<b>0.02</b>			<b>2.15</b>
	0.09	0.05	0.08	0.03	0.08	0.05	0.01	0.01	0.00			0.40
3	<b>0.53</b>	<b>0.46</b>	<b>0.37</b>	<b>0.33</b>	<b>0.14</b>	<b>0.08</b>	<b>0.08</b>	<b>0.04</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>2.08</b>
	0.14	0.10	0.06	0.04	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40

A los valores de pérdida de nitrógeno ya les fueron restados la pérdida de nitrógeno natural del suelo.

En la figura III-28, se muestra el curso de la volatilización posterior a las tres aplicaciones de fertilizante y los eventos de precipitación en esos lapsos. Se observa un comportamiento levemente diferencial entre la primera y la tercera aplicación con respecto a la segunda que en

términos totales no es importante, pero puede ayudar a explicar las pérdidas por esta vía. Hay que recordar que los datos están graficados como ocurrieron, pero por efectos de manejo de las trampas la precipitación está retrasada, ya que luego del evento es que se agregaba el agua a la trampa con excepción del día cero que llovió antes de instalar las trampas. Las aplicaciones uno y tres estuvieron precedidas por eventos de precipitación de 30 y 43 mm que parecen haber provocado un menor valor inicial de volatilización, en comparación con la segunda aplicación que tenía ocho días sin llover y se produce una volatilización mayor, que también se observa en la pérdida del suelo sin fertilizante, en general este flujo se ve favorecido por las lluvias frecuentes; además se observa que después de cuatro días se produce una disminución drástica de la pérdida de nitrógeno del fertilizante.

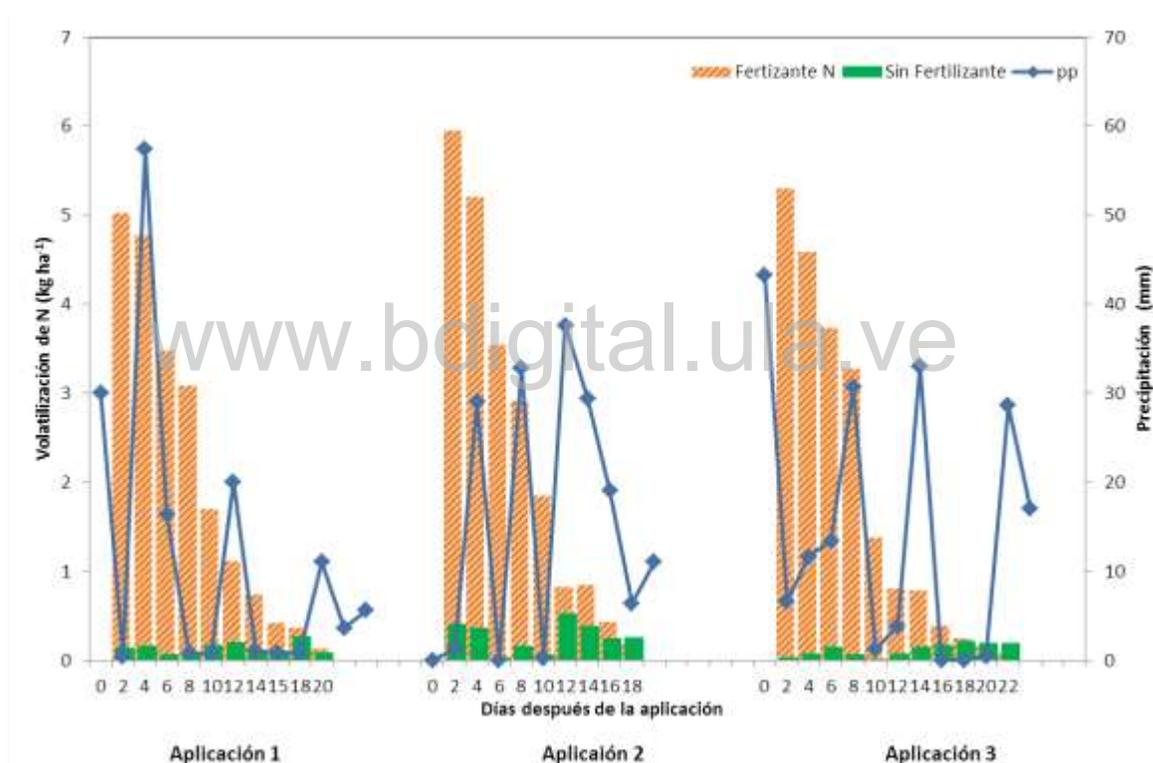


Figura III-28. Curso de la pérdida de nitrógeno por volatilización en las tres aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en el cultivo de plátano Hartón en los tratamientos con y sin aplicación de fertilizante en forma de urea.

### III.3.5. Balance de nitrógeno

El balance global de nitrógeno del agroecosistema plátano, en términos de entradas y salidas, se presenta en la figura III-29. De las entradas totales la precipitación representó el 2,5% y la fertilización el 97,5%. Las salidas del agroecosistema representaron el 91% del nitrógeno total ingresado, distribuidas en orden de importancia fueron: lavado con el 53,5%, volatilización (del

fertilizante y natural) 23,4%, cosechado en el racimo 11,6%, erosión 6,7% y escorrentía 4,8% y dentro del sistema quedó un total aproximado de 9% al final del primer ciclo de cultivo. En este punto se debe aclarar que el lavado de nitrógeno se calculó por el modelo de simulación, multiplicando el drenaje estimado por la concentración de  $\text{NO}_3$  en la capa 2 (el procedimiento se explica en el capítulo V). Llama la atención que una cantidad equivalente a prácticamente todo el fertilizante aplicado al sistema se pierde a través de las diferentes vías, predominando las pérdidas por drenaje y volatilización sobre aquellas que se producen por escorrentía y erosión, aunque el flujo de agua por escorrentía es la salida más importante en el balance hídrico.

En el cálculo del balance de nitrógeno no se está considerando que probablemente ocurren aportes de nitrógeno por otras vías como la fijación por cianobacterias; así mismo, la pérdida por desnitrificación no fue considerada debido a que supusimos que por el pH ácido estas no serían importantes, aunque debido a la dinámica de la humedad del suelo y los niveles de precipitación pudieran haberse presentado en ciertos momentos durante el ciclo del cultivo micrositios anaeróbicos que favorecerían este proceso ya que las otras condiciones como temperatura, textura y materia orgánica de fácil descomposición no fueron limitantes (tabla III-18), de ocurrir este flujo podría cambiar la cantidad de nitrógeno que se está obteniendo por lavado que fue estimada por el modelo, por lo tanto estos dos flujos (desnitrificación y lavado) deberán ser medidos para determinar la existencia y magnitud de la desnitrificación y validar los resultados obtenidos del modelo con respecto al lavado.

En la figura III-30, se presenta un balance de nitrógeno más detallado, considerando algunos flujos internos entre compartimientos en tres intervalos de tiempo durante el ciclo del cultivo y para el ciclo total. Se observa que durante la primera etapa del cultivo (figura III-30A) los flujos más importantes con respecto a la cantidad de nitrógeno fueron la fertilización y la volatilización del fertilizante más la volatilización desde el suelo como entrada y salida respectivamente, en los flujos de transferencia fue la absorción por la planta, este balance parcial nos muestra que la cantidad de nitrógeno aplicado en el fertilizante fue más del doble de la absorción de la planta por lo que se deberá ajustar la dosis o el momento de la aplicación para que se acople a los requerimientos de la planta en esta etapa. La figura III-30B, nos muestra la segunda etapa del cultivo donde tiene lugar el mayor crecimiento de la planta madre, con la principal entrada por fertilización (tercera aplicación) y la salida por lavado, en esta etapa ocurrió lo contrario que en la anterior, el nitrógeno aplicado fue inferior a la absorción por la planta, indicando que se debe ajustar el plan de fertilización para este elemento. En la última etapa (figura

III-30C), que culmina con la cosecha del racimo, solo ingresó nitrógeno por la lluvia y la principal salida fue por lavado, luego de la cosecha, internamente se observa que la planta presenta una baja absorción en comparación a las etapas previas, que indica un alto grado de translocación del nitrógeno de la planta y por ocurrir la cosecha al final del período el aporte de necromasa es mayor por lo que prácticamente la totalidad de ese nitrógeno podrá ser aprovechado por el siguiente ciclo de producción.

El balance general del agroecosistema plátano Hartón durante el primer ciclo de producción (figura III-30D), nos muestra que la principal entrada de nitrógeno es la fertilización y la principal pérdida es el lavado. A nivel del suelo se presentó un aporte importante por mineralización y por mortalidad o incorporación de la necromasa; sin embargo, el nitrógeno mineral culminó con balance negativo, por lo tanto se deben realizar esfuerzos en mejorar, como se indicó anteriormente, el plan de fertilización del cultivo sincronizado con las etapas de mayor absorción y buscar alternativas para reducir la contaminación que se está provocando por pérdidas de nitrógeno por lavado que son altas seguidas por la volatilización y en menor grado la escorrentía y erosión, aunque esta última puede ser importantes por la cantidad de suelo que es arrastrado fuera de la parcela.

www.bdigital.ula.ve

De 0 a 293 DDS

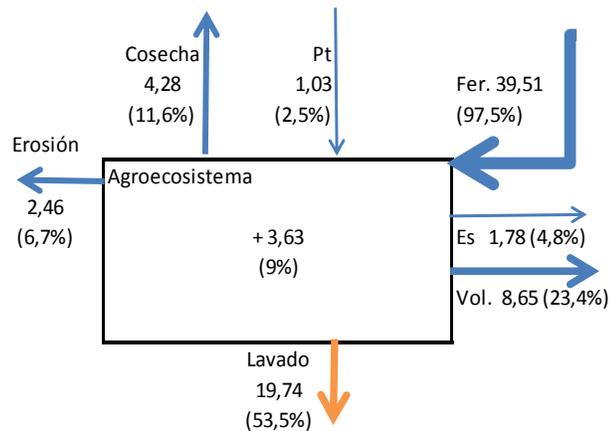


Figura III-29. Balance de nitrógeno del agroecosistema del plátano Hartón entre la siembra y la cosecha. Se consideran solamente las entradas y salidas. El lavado fue estimado utilizando el modelo. Los flujos están dados  $\text{g.m}^{-2}.\text{ciclo}^{-1}$ . Flujos de entrada por precipitación (Pt), fertilización (Fer.), flujos de salida por volatilización (Vol.), escorrentía (Es), lavado, erosión y cosecha. El lavado fue estimado de los resultados del modelo. El símbolo (+) representa ganancia.

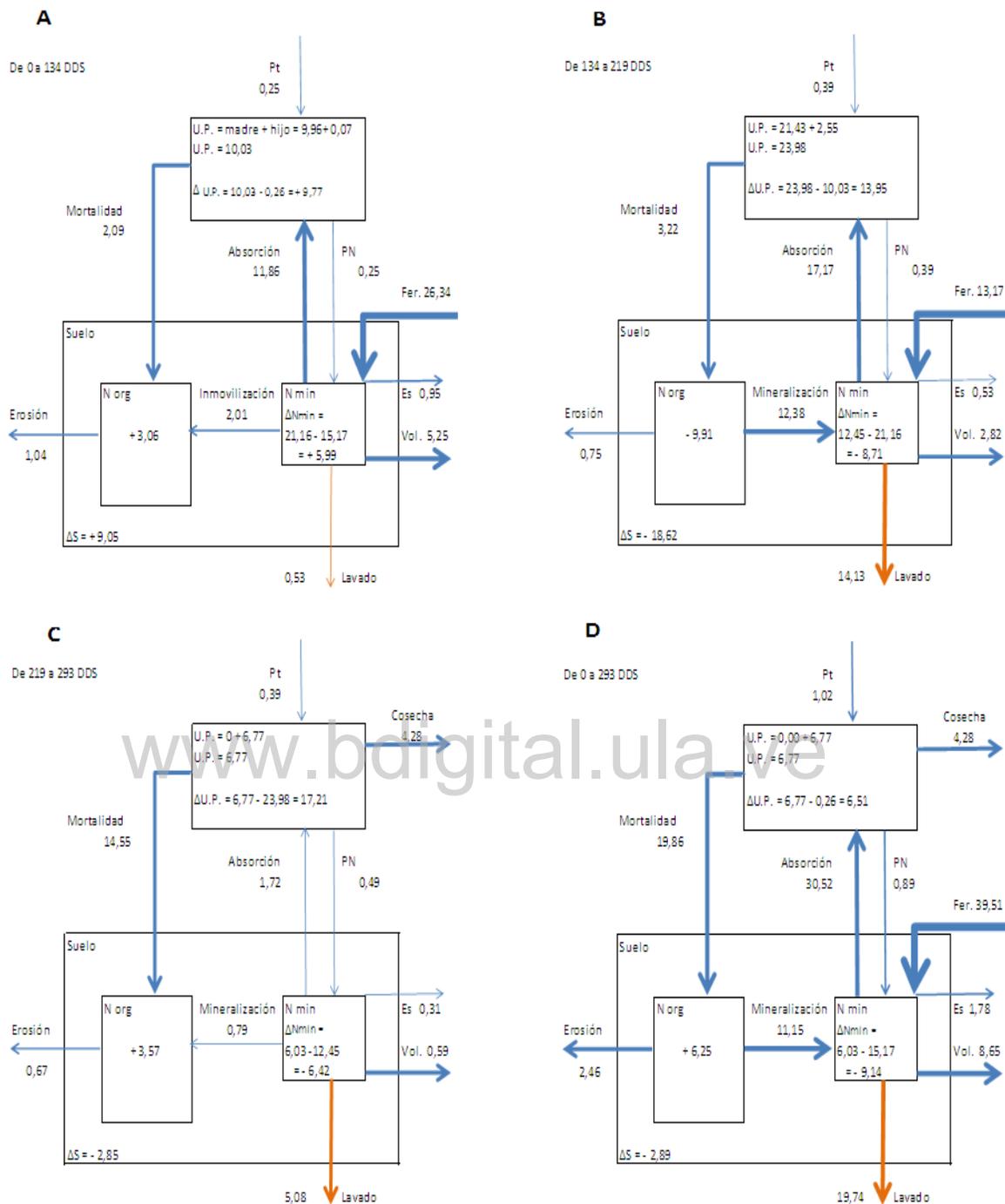


Figura III-30. Balance de nitrógeno del agroecosistema plátano en cuatro períodos, expresado en  $gN.m^{-2}$ . A. Siembra a Diferenciación floral; B. Diferenciación floral a Emergencia de la bellota; C. Emergencia de la bellota a Cosecha y D. Siembra a Cosecha. Flujos de entrada por precipitación (Pt), fertilización (Fert.), flujos de salida por volatilización (Vol.), escorrentía (Es), lavado y cosecha; transferencias internas por precipitación neta (PN), absorción, mortalidad y los compartimientos de suelo con el nitrógeno orgánico (N org), nitrógeno mineral (N min) y el flujo de mineralización o inmovilización; unidad de producción (U.P.), Variación de nitrógeno del suelo ( $\Delta S$ ). El lavado fue estimado de los resultados del modelo. Los símbolos (+) y (-), representan ganancia o pérdida durante el intervalo.

### III.3.6. Flujos de mineralización-inmovilización

Los flujos de mineralización-inmovilización calculados por balance (figura III-31), presentan una tendencia inicial donde predomina la inmovilización, entre la siembra y los 98 DDS, que incluye la primera fertilización. Esto podría favorecer la protección del nitrógeno mineral en este período de poca demanda por la planta y se podría estar protegiendo parte del nitrógeno agregado en esa primera fertilización. En una segunda etapa, que va desde los 98 DDS hasta la cosecha, predominan los flujos de mineralización, la materia orgánica del suelo actúa como suministrador de nitrógeno mineral, que puede estar supliendo la demanda del cultivo. Esta última etapa coincide con los aportes de necromasa del cultivo, que podrían en parte explicar los flujos de mineralización. Como se observa, es una dinámica compleja con cambios de dirección de los flujos, que amerita estudios más detallados para su comprensión, incluyendo análisis de la biomasa microbiana.

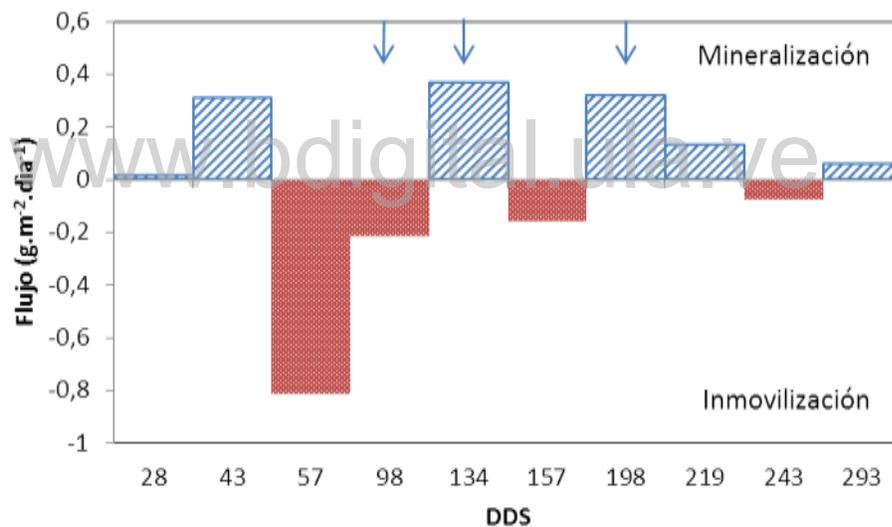


Figura III-31. Flujos netos de mineralización e inmovilización en  $\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ , entre los períodos muestreados. Las flechas indican los momentos de la fertilización. Los flujos fueron calculados por balance entre entradas y salidas al compartimento de nitrógeno mineral.

## **CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES**

La fertilización nitrogenada, continuará jugando un papel muy importante para la producción de los cultivos, por lo tanto, son necesarios métodos y estrategias adecuados para optimizarla en lo posible, aumentando la sincronización entre la demanda de las plantas y la disponibilidad en el suelo. En este sentido, es fundamental determinar la demanda de N por el cultivo, conocer los procesos que determinan la inmovilización-mineralización en el suelo, identificar los períodos de mayor riesgo de pérdidas, calcular el suministro por fertilización necesario para suplir la demanda y reducir las pérdidas. Todo ello permitirá ir generando una estrategia de manejo cuyo objetivo sea la eficiencia del agroecosistema desde el punto de vista productivo, económico y ambiental, claro está, considerando los demás factores intervinientes (Mosier *et al.*, 2004, Balasubramanian *et al.*, 2004, Machado, 2005, Machado *et al.*, 2010a, Machado y Sarmiento, 2012). Es así como una buena comprensión de las características del cultivo, el ambiente y el manejo agronómico y sus interacciones son un requisito para el diseño de estrategias para mejorar la eficiencia del sistema y mantener o mejorar la sustentabilidad de la producción (Balasubramanian *et al.*, 2004; Estrada *et al.*, 2005; Ndabamenye *et al.*, 2013). Sin embargo, en el sur del lago de Maracaibo, esta información es muy limitada, y lo es también en general para el cultivo de musáceas y de plátano en particular, por lo tanto, en este trabajo se recabó información básica sobre los procesos más importantes del funcionamiento agroecosistémico del cultivo de plátano, incluyendo dinámica del crecimiento, balance hídrico y balance de nitrógeno, como punto de partida para continuar las investigaciones necesarias para un manejo más integral y sustentable de este cultivo.

En este capítulo de discusión, se resaltarán los principales aportes derivados de esta tesis, se intentará dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas en base a la información recabada y se resaltarán las vinculaciones de la información obtenida con el modelo de simulación, además de la correspondencia con la literatura consultada. Para esto se seguirán las tres líneas transversales abordadas en la tesis, como son la dinámica de la fitomasa, el balance hídrico y el balance de nitrógeno.

### **IV.1. Dinámica de la fitomasa y su contenido de nitrógeno en relación con las etapas de crecimiento del plátano Hartón**

Comprender la dinámica de crecimiento de las plantas cultivadas, tanto anuales como perennes, es de fundamental importancia para su manejo agronómico y es uno de los puntos de

partida para la construcción de modelos de simulación que puedan servir de apoyo para la toma de decisiones (Gormley y Sinclair, 2003; Candelaria *et al.*, 2011). Particularmente relevante es analizar como el crecimiento de los cultivos y sus procesos fisiológicos subyacentes, se ven influenciados por las variaciones del genotipo, del ambiente y del manejo agronómico, que conforman el andamiaje por medio del cual los factores indicados controlan la producción y calidad de los productos (Cayón, 2004).

En el caso de los cultivos anuales, su corto tiempo de desarrollo, aunado al pequeño porte de las plantas, ha facilitado el análisis del crecimiento y ha permitido tener una buena comprensión de como factores del ambiente, influyen procesos como los patrones de distribución de la biomasa, las tasas fotosintéticas, la eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno, entre otros (ver por ejemplo el trabajo de Villa (2007) en el cultivo de papa). En el caso de cultivos perennes se dispone de mucha menos información, debido a la necesidad de experimentos mucho más prolongados y a la dificultad de estimar algunas variables a través de muestreos destructivos de individuos de gran porte. Las plantas de plátano, como hierbas perennes, plantean desafíos muy particulares, y en cierto sentido, son intermedias entre plantas anuales y perennes, ya que la planta (vástago) es anual, pero a través de su sistema de reproducción vegetativa, va produciendo nuevos vástagos (hijos) simultáneamente al desarrollo del vástago principal (madre), los cuales permanecen subordinados hasta que el mayor reemplaza al principal luego de la cosecha del racimo. Estas características del cultivo de plátano resultan en procesos de transferencia de asimilados y nutrientes entre la madre y sus hijos y de sombreado de los hijos por la madre, que están ausentes en las plantas anuales.

Diseñar modelos matemáticos de producción que consideren los profundos cambios que se producen en la asignación de la biomasa a los órganos (raíces, seudotallo, hojas, racimo) a medida que se desarrolla cada vástago y al mismo tiempo considere la asignación de la biomasa a los hijos y nietos es un aspecto que hay que enfrentar para construir un modelo de desarrollo del cultivo de plátano y de otros similares como el banano. El plátano regula sus procesos fisiológicos para mantener el crecimiento armónico de sus órganos durante las etapas del ciclo de producción y posee una gran plasticidad para adaptarse a múltiples condiciones (Cayón, 2004; Galán y Robinson, 2013); de allí la necesidad, de obtener información para que su aplicación en el modelo de simulación resulte lo más ajustado a la realidad posible.

#### IV.1.1. Dinámica de la fitomasa del plátano Hartón

El crecimiento de las musáceas está influenciado por las condiciones climáticas, por ejemplo Turner (1994), señala que en los trópicos, el ciclo desde la siembra a la cosecha puede durar tan poco como nueve meses y se puede extender a dos años en zonas con clima subtropical o en mayores altitudes en el trópico. Un modelo comprensivo del desarrollo de la planta implicaría conocer cómo ésta responde a las diferentes condiciones del medio, incluyendo temperatura, radiación, precipitación, suelo, fotoperíodo, entre otros. Esto sin embargo, excede los objetivos de este trabajo, donde nos hemos planteado conocer el desarrollo del cultivo bajo condiciones relativamente óptimas de suministro de agua y nitrógeno y bajo las condiciones edafoclimáticas de estudio en el Sur del Lago de Maracaibo, mayor zona productora de Venezuela.

En la tabla IV-1 se compara la biomasa final por planta y por área, así como la duración del ciclo, obtenidas en este experimento con información disponible en la literatura de diversas fuentes (Samuels *et al.*, 1978; Sancho, 1996; Belalcázar, 1999 y Castillo *et al.*, 2011), especificando las condiciones en que se desarrolló el cultivo en cada caso. Aunque la información que pudo ser recabada corresponde a pocos puntos, aparecen algunas relaciones claras (figura IV-1), que por supuesto requerirían en un futuro un mayor apoyo experimental. En este sentido podemos observar una relación lineal entre la duración del ciclo de cultivo y la elevación (figura IV-1A), indicando que el tiempo de desarrollo, hasta la cosecha de la planta madre, aumenta aproximadamente 15 días cada 100 m de elevación. Como la altitud está directamente relacionada con la temperatura, a través del llamado gradiente altotérmico, esta relación podría ayudar para ajustar los ciclos fenológicos a la temperatura con fines de modelización.

Con respecto a la biomasa total, ya sea expresada por planta o por unidad de área (figura IV-1B), no se observó una relación con la altitud, indicando que la producción del cultivo depende de otros factores. Por el contrario, se observó una relación negativa entre el área ocupada por cada planta y la producción por unidad de área (figura IV-1C), lo que indica que cuanto mayor la densidad de siembra mayor la producción por unidad de área. En tal sentido pareciera que incluso a densidades cercanas a 3000 plantas.ha<sup>-1</sup> no hay un efecto deletéreo sobre la producción. Esto se explica porque el rendimiento por planta no aumenta en relación al área disponible para cada planta en el intervalo de densidades de siembra analizado (figura IV-1D), pareciendo que la competencia intraespecífica comienza a densidades muy altas. Se puede observar que tanto la producción por planta como por área en nuestro experimento estuvo por debajo a la esperada para su densidad de siembra, indicando que hay algún factor limitante. Si extrapolamos

deberíamos haber obtenido una producción 49% superior a la observada (2419 en vez de 1242 g.m<sup>-2</sup>) para igualar la de las demás plantaciones reportadas en la tabla. Como elemento explicativo es de particular interés la relación positiva obtenida entre el contenido de MOS y la producción por planta, la cual sugiere que la menor producción obtenida en el Sur del Lago puede estar relacionada con características edáficas que se asocian a una baja materia orgánica, como una deficiencia de nitrógeno o una baja capacidad de retención de agua o de nutrientes. Rodríguez *et al.* (2007), presentan una relación similar para la misma región entre el peso del racimo y la MOS, aspecto de gran interés en aras de mejorar el rendimiento del cultivo a través del incremento progresivo de la MOS por prácticas de manejo apropiadas. Por otro lado, considerando la alta pluviosidad del Sur del Lago, también pudo presentarse una limitación por radiación solar en relación con otras regiones menos lluviosas. Con respecto al pH (figura IV-1F), no se observó una relación definida, por estar la mayoría de los puntos con pH similares.

Tabla IV-1. Producción de biomasa total planta madre del cultivo de plátano según diferentes autores con respecto a las condiciones edafoclimáticas y densidad de siembra (D. siembra).

Fuente	Cultivar	Tipo de Suelo	D. siembra (Plantas.ha <sup>-1</sup> )	Altitud (msnm)	Ciclo (Días)	Producción (gMS.planta <sup>-1</sup> ) (gMS.m <sup>-2</sup> )
Samuels, (1978) Puerto Rico	Maricongo	Textura pH MO (%)	Área (m <sup>2</sup> )	Temp. (°C) Pp (mm)		
		Typic Arcilloso 6,50 3,24	Tropohumults 2988 3,35	650	390	9713,0 2899,4
Sancho, (1996) Costa Rica	Curraré semigigante	Fluvaquentic Franco arenoso; 6,24 4,03	Eutropept 9	1111 22 24,7 3300	319	14931,7 1659,1
		Andisol Franco Arcilloso; 6,40 4,70	1111 9	1320 22 2100	510	12967,0 1440,8
Belalcázar, (1999). Colombia	Dominico Hartón	---	625	440	---	10570,0
		Franco arenoso 4,60 3,00	16	>18 >480		660,6
Presente Trabajo Venezuela	Hartón	Fluventic Franco; 5,80 1,36	Eutropepts 1976 5,06	54 26,4 2163	293	6793,2 1242,4

La máxima acumulación de materia seca, se obtuvo al momento del corte del racimo, igual a lo presentado por Samuels *et al.* (1978), producto de la biomasa acumulada por el racimo seguido del seudotallo y el cormo, similar a lo observado por Belalcázar *et al.* (1999) y Castillo *et al.* (2011).

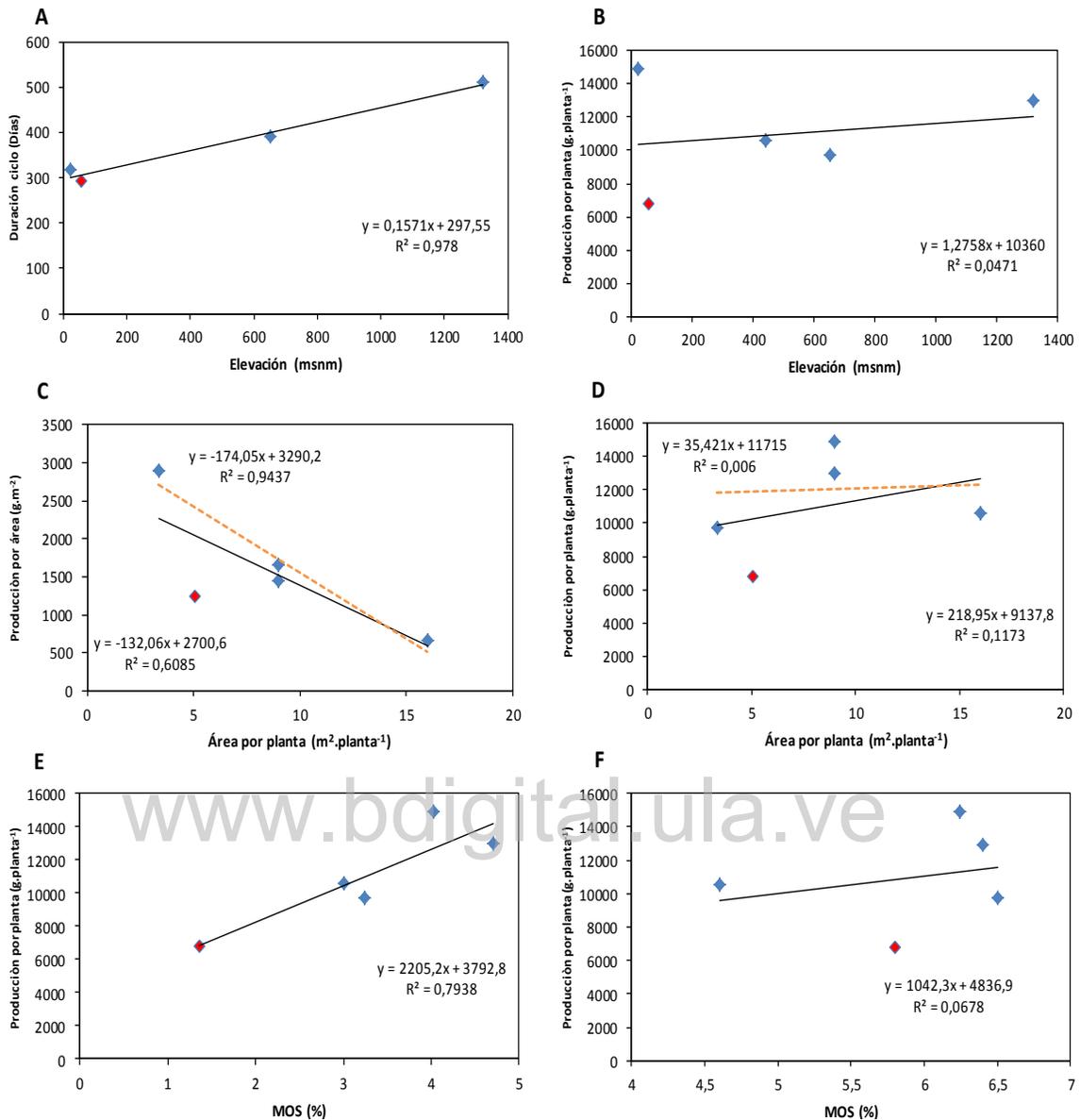


Figura IV-1: Regresiones lineales establecidas con la información de la tabla IV-1. Relaciones entre: A. la elevación y la duración del ciclo de la planta madre, B. la elevación y la producción por área, C. el área por planta y la producción por área, D. entre el área por planta y la producción por planta, E. la MOS y la producción por planta y F. el pH y la producción por planta. El punto rojo corresponde a los datos de esta tesis. En algunos casos la regresión se calculó incluyendo o excluyendo el punto de esta tesis.

En este trabajo se observó una marcada disminución de la biomasa delseudotallo y el cormo después de la emergencia de la bellota, a diferencia de los trabajos de Samuels *et al.* (1978), Belalcázar *et al.* (1999) y Castillo *et al.* (2011), producto de la translocación para el llenado del racimo (Turner, 1972; Chaves *et al.*, 2009), que puede estar relacionado con la duración del ciclo del cultivo.

#### IV.1.2. Etapas de crecimiento

En este punto en particular, se brindarán algunos aportes para complementar las diferencias en las etapas de crecimiento, ya que es un punto de gran interés como indican Belalcázar (1991) y Rodríguez y Rodríguez (1999), ya que el conocimiento que se tenga de cada elemento estructural de la planta permite modelar u orientar el diseño del manejo agronómico a seguir durante el desarrollo del cultivo con el fin de lograr una exitosa producción platanera y en este caso además es una información muy relevante para la construcción del modelo de simulación.

Como se presentó en los antecedentes, existen varios criterios con respecto a las etapas de crecimiento, los cuales se pueden agrupar en los que plantean dos fases: vegetativa y reproductiva (Aristizábal y Jaramillo, 2010; Galán y Robinson, 2013) y los que plantean tres etapas: la primera como vegetativa o establecimiento, la segunda floral o reproductiva y la tercera fructificación o productiva, que además incluyen subdivisiones dentro de las mismas (Simmonds, 1973; Belalcázar, 1991; Sancho, 1996).

En este trabajo, en base a las explicaciones dadas por los diferentes autores y los resultados obtenidos, se siguió el patrón de las tres etapas de crecimiento y la división de la primera en dos fases (Tabla III-1), a continuación se indican los aspectos obtenidos que nos llevan a esta selección.

##### IV.1.2.1. Etapa de crecimiento vegetativo

En esta etapa, la planta construye el sistema de raíces para los procesos de absorción y las hojas para la asimilación fotosintética (Cayón, 2004). Se inicia con la siembra del cormo y continúa hasta la diferenciación del meristema apical. Se delimitaron dos fases, la primera se llamó establecimiento y la segunda de crecimiento vegetativo, siguiendo la denominación dada por Sancho (1996).

- Fase de establecimiento

En esta fase la planta experimenta un período de crecimiento lento que coincide con lo planteado por Belalcázar (1991) y Sancho (1996), debido a la dependencia de las reservas del cormo para la continuación del crecimiento, observándose como este órgano experimenta una disminución de su biomasa por los procesos de respiración y translocación de asimilados para la formación de nuevas estructuras aéreas y subterráneas, que se refleja en la baja tasa de crecimiento (Figura III-5). Así mismo, el cormo presenta una baja concentración de nitrógeno que indica su función de almacenamiento que se traduce en una planta joven con una relación C/N alta

y un déficit de nitrógeno inicial que es morfológico y no debido a déficit en el suelo (tabla III-18; figura III-10). Este proceso de crecimiento lento se prolonga hasta alrededor de la emergencia de la hoja 13 (98 DDS). En el rango de las primeras 16 hojas establecido por Sancho (1996), se forma el segundo cormo (se refiere al cormo que se desarrolla sobre el cormo sembrado y es el que se desarrolla para formar la planta) y marca el fin de la fase de establecimiento, debido a que para entonces la planta cuenta con un aparato fotosintético activo y un sistema radicular distribuido hasta un metro de distancia desde el cormo, similar a lo reportado por Belalcázar (1991) en la etapa de organogénesis, las tasas de crecimiento y de absorción de nitrógeno experimentan un aumento gradual, que se traduce en la relación BA/FS que alcanza un valor cercano a uno, en vías de lograr el equilibrio entre las estructuras aéreas y subterráneas. Por el contrario, la relación C/N permanece constante, dominada por las estructuras subterráneas, lo que confirma que esta fase es preparatoria para iniciar el crecimiento acelerado subsiguiente (Sancho, 1996; Cayón, 2004).

- Fase de crecimiento vegetativo

Esta es una fase corta que se incluyó, a diferencia de lo presentado por Belalcázar (1991), Sancho (1996) y Aristizábal y Jaramillo (2010) que no la consideran, caracterizada por un crecimiento exponencial que le permite a la planta incrementar su fitomasa en 3,4 veces y el nitrógeno acumulado en 3,9 veces, en general todos los órganos, incluyendo el hijo, aumentan de tamaño y el sistema radicular ya se localiza hasta los 50 cm de profundidad. Se alcanza el valor de 1 en la relación BA/FS, indicando el equilibrio de las estructuras no sólo entre las aéreas y subterráneas sino además entre las estructuras de asimilación y absorción con las de almacenamiento y sostén. El índice de área foliar es la mitad del valor máximo y la eficiencia del uso de la luz alcanza el máximo valor. Las tasas de crecimiento absoluto y absorción de nitrógeno llegan a sus valores máximos, la relación C/N de la planta madre disminuye a la mitad con respecto al momento de la siembra, todo esto indica los cambios que experimenta la planta para que ocurra la diferenciación del meristema apical de vegetativo a reproductivo, que es cuando se da por finalizada esta fase.

#### IV.1.2.2. Etapa reproductiva

Esta etapa se inicia con la diferenciación del meristema apical y ocurren en paralelo dos procesos, uno es la continuación de la emergencia de alrededor de 12 hojas nuevas y el otro es el crecimiento y ascenso dentro del seudotallo del tallo y la inflorescencia (bellota) y termina con la emergencia al exterior de la bellota, igual como lo señala Sancho (1996) y a diferencia de

Belalcázar (1991) que la establece solo para la formación de la inflorescencia. En este trabajo observamos que en esta etapa, continúa el crecimiento exponencial con una tasa de crecimiento absoluto y absorción de nitrógeno similar a la fase anterior, incrementando su fitomasa en 2,9 veces y el nitrógeno 2,2 veces, alcanzando los máximos valores de biomasa en los órganos aéreos y fitomasa de los subterráneos. Los valores máximos de acumulación de nitrógeno se alcanzaron en los órganos de absorción y asimilación hacia el final de la etapa. Estos valores de acumulación de fitomasa y nitrógeno se ven reflejados en las relaciones de BA/FS y C/N, donde se observa que la planta se está preparando para la fase productiva por lo que la relación de BA/FS, se incrementa, producto de la importancia que adquiere la biomasa aérea por el cambio de función del seudotallo, que crece a una de las mayores tasas que se conocen para los cultivos perennes tropicales (Belalcázar, 1991; Cayón, 2004). La planta llega al valor máximo del índice de área foliar que se encuentra entre 2 y 5, este es un rango amplio, debido a factores como, las condiciones climáticas de cada lugar, la densidad de siembra y el cultivo, entre otros, con los mayores valores de LAI, permite captar una proporción de la luz incidente máxima de 90% y la eficiencia del uso de la luz disminuye por efecto del sombreado y maduración de las hojas (Turner, 1994 - 2007; Cayón, 2004; Galán y Robinson, 2013).

Con respecto a la planta hijo se observa que debido a la pérdida de dominancia apical de la planta madre, presenta un crecimiento exponencial de su biomasa y acumulación de nitrógeno de todos sus órganos incluyendo el nieto, similar a lo reportado por Belalcázar (1991).

#### IV.1.2.3. Etapa productiva

La etapa productiva, a diferencia de lo establecido por Belalcázar (1991), se tomó desde la emergencia de la bellota, seguido por la floración donde ocurre la apertura de las brácteas, formación y despliegue de las flores femeninas que darán origen a los frutos (dedos) y la fase de llenado de los frutos. En esta etapa la planta presentó menores tasas de crecimiento absoluto y de acumulación de nitrógeno, por lo que el incremento de la biomasa fue solo 1,30 veces y el nitrógeno disminuyó 0,13 veces, con respecto a la etapa anterior. La relación de BA/FS, que presenta la planta madre indica que el crecimiento es bajo y se produce una redistribución de los asimilados para el llenado del racimo, la relación se incrementó en 1,09 con respecto al valor presentado al momento de la emergencia de la bellota, demostrando la importancia del componente aéreo al final del ciclo de la planta madre. Esta retranslocación de asimilados se evidencia en la disminución que experimentan los órganos desde el inicio de esta etapa como

indican Summerville (1944) citado por Simmonds (1973), Turner (1972) y Castillo *et al.* (2011), que se observa claramente en la tasa de crecimiento absoluta del racimo y la tasa de retranslocación de asimilados que es el flujo más importante para el llenado del racimo (figura III-5.A). La tasa de retranslocación de nitrógeno hacia el racimo es más baja debido a que el contenido de nitrógeno en este órgano es bajo y está asociada a los períodos de removilización de asimilados.

La planta hijo en esta etapa, presenta una disminución en la velocidad de crecimiento, posiblemente ocasionada por la emergencia del racimo, tal como indica Martín-Prevel (1979), que los hijos luego de comenzar su vida autónoma parecen comportarse tanto como competidores como abastecedores, frente a la importancia del racimo, que además, se observa en la tasa de crecimiento absoluto y acumulación de nitrógeno. Así mismo, la tasa de retranslocación de asimilados continua hasta el final de la etapa de llenado del racimo, por el contrario la tasa de retranslocación de nitrógeno se inicia al mismo tiempo que la del racimo y no disminuye. Con respecto a la relación BA/FS está indicada que el hijo está alcanzando la independencia de la madre con el equilibrio entre las estructuras aéreas y subterráneas, lo que indicaría que está próximo a la diferenciación floral, comparado con el comportamiento observado en la planta madre en esa variable.

Al comparar la planta hijo y la madre al momento de la cosecha, observamos que el hijo corresponde aproximadamente a una cuarta parte de la fitomasa de la madre y que esa fitomasa corresponde en la planta madre a la fase de crecimiento vegetativo, por lo tanto el hijo es una planta adulta, tal como se observa en los órganos, donde los cormos son del mismo tamaño al igual que las raíces, diferenciándose en las hojas, ya que el hijo presenta un valor un poco mayor y con el seudotallo si existe una diferencia alta de  $175,43 \text{ gMS.m}^{-2}$ , que denota que este órgano está todavía en crecimiento y no ha cambiado completamente a la función de almacenamiento, ya que por su fitomasa está igualmente en la fase de crecimiento vegetativo de la madre (Tabla III-1).

En este trabajo, se han dado algunos aspectos que dirigen el desarrollo de los hijos en la planta, como la relación C/N y externos que condicionan esta secuencia en las plantaciones. Esta secuencia de los ciclos de producción en las plantaciones comerciales, no es del todo natural, ya que el manejo afecta la sincronización desde la selección de los cormos en las plantaciones donadoras, ya que el personal toma hijos de diferentes edades, con el único criterio de selección, de tamaño del cormo, por lo tanto se toman hijos puyones y banderas, que luego al separarlos por peso o tamaño del cormo antes de la siembra, quedan mezclados y por tener esa diferencia de edad, el ciclo de producción tiene diferentes tiempos entre la cosecha del primer y último racimo

de la plantación. El siguiente ciclo (hijo), también se inicia de forma desigual, porque la maduración de las yemas que darán los hijos es diferente, luego están las variaciones edafológicas que pueden influir en el desarrollo de la planta y finalmente el personal que realiza la labor del deshije, que dependiendo de la posición del hijo con respecto a la orientación de la plantación o ubicación del racimo, puede eliminar el hijo más grande y dejar uno más pequeño y en la medida que transcurren los ciclos la heterogeneidad de la plantación es mayor. Esto es sin duda un aspecto que puede dificultar la modelización cuando ésta se hace en función de un individuo y no de la población.

En este momento disponemos de los elementos para dar respuesta a la pregunta de investigación número 1, sobre la importancia de los flujos de retranslocación en la planta de plátano. Como se indicó, la importancia de este flujo se ve reflejada en dos etapas de crecimiento, la primera durante el establecimiento del cultivo después de la siembra, donde el flujo de retranslocación es relevante para la recuperación de las estructuras asimiladoras y de absorción a partir de los asimilados del cormo y la segunda en la fase productiva donde la retranslocación es esencial para el llenado del racimo, que se realiza en un porcentaje del 60% a partir de los asimilados almacenados en el seudotallo y el cormo principalmente. Asimismo, como veremos más adelante para el nitrógeno, también se observa que el flujo de retranslocación para este elemento sigue el mismo comportamiento que el flujo de retranslocación de asimilados debido a que del contenido total de N en el racimo, un alto porcentaje proviene de esta vía.

#### IV.1.3. Análisis de la distribución de la fitomasa radical

El sistema radicular de las musáceas está conformado por raíces adventicias, con una distribución más horizontal que vertical, orientadas radialmente, poco profundas (Blomme *et al.*, 2000; Belalcázar *et al.*, 2005; Turner *et al.*, 2007), esta generalización fue observada en el sistema radicular del plátano Hartón como se muestra en la figura III-4, donde además se observa, como refiere Belalcázar (1991) para Dominico Hartón (*Musa* AAB) y Araya y Blanco (2001) para Banano (*Musa* AAA), que las raíces decrecen horizontalmente al alejarse del cormo. Se puede resaltar que el mayor desarrollo radicular se encontró entre la diferenciación floral (134 DDS) y la emergencia de la bellota (219 DDS), a diferencia de lo reportado por Carr (2009) que indica que la fase principal de crecimiento radicular es desde la siembra y termina en la floración, igual a lo encontrado por nosotros.

Con respecto a la profundidad de las raíces, los resultados concuerdan con Price (1996), Lecompte *et al.* (2002), Carr (2009) y Rodríguez y López (2014), que indican que la profundidad se limita a una capa entre los 30 a 45 cm y algunas veces exceden los 60 cm, para realizar funciones de absorción y anclaje, que para este caso alcanzó a los 50 cm como límite del área muestreada, con un 27% del total de la fitomasa radicular en la capa de 20 a 50 cm. Esta información nos muestran que la planta efectúa una exploración adecuada de la primera capa del suelo, ya que desde el final de la etapa de crecimiento vegetativo, está presente en toda el área que le corresponde horizontalmente y posiblemente más allá por efecto del largo reportado en la literatura que pueden alcanzar más de dos metros (Belalcázar *et al.*, 2005; Blomme *et al.*, 2008) y no tan buena en la segunda capa ya que al tener mayor volumen de suelo, con una cantidad de raíces menor, es menos explorada (Fogain y Gowen, 2005).

La fitomasa total del sistema radicular obtenida para el plátano hartón (944,64 g.UP<sup>-1</sup>), se encuentra dentro del rango encontrado en la literatura para las musáceas, pero con valores un 281% más altos a los reportados por Blomme *et al.* (2005b) y un 3% más bajos que los de Mukasa *et al.* (2005) quienes obtuvieron en diferentes clones de plátano valores en el rango de 336 a 970 g.UP<sup>-1</sup> al momento de la floración, con tendencia similar a disminuir al momento de la cosecha de la planta madre.

Durante el período de máximo desarrollo de la planta (134-219 DDS), observamos que el sistema radicular se duplica, debido a la necesidad de la planta de mayor cantidad de agua y nutrimentos, ya que el crecimiento exponencial ocurre con todos los órganos, sin embargo, la mayor densidad ocurre cerca del cormo, donde se observa claramente el contraste con el resto de las distancias, de tal forma que alrededor del cormo hasta los 40 cm de distancia y a 20 cm de profundidad se concentra el 53% del sistema radicular y si llegamos a 50 cm de profundidad se eleva a 57% y en el resto del área, hasta los 100 cm desde el cormo, se encuentra 33% y ampliando a 50 cm de profundidad alcanza el 43%, por lo tanto el área cercana al cormo es explorada más intensamente que el resto, también hay que acotar que parte de estas raíces, como indica Belalcázar *et al.* (2005), debido al proceso de envejecimiento, pierden la capacidad de absorción pero mantienen la de conducción.

Del análisis de la distribución espacial de las raíces, surge la inquietud de que el problema de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo reviste de un importante aspecto espacial que debería tenerse en cuenta en la modelización. Siendo la distribución de las raíces heterogénea en ambas direcciones (horizontal y vertical) y siendo también la aplicación del fertilizante

heterogénea, ya que se efectúa en una banda alrededor de la planta y sobre la superficie del suelo, la disponibilidad y accesibilidad del nitrógeno también serán altamente heterogénea. En este sentido, no sólo será importante analizar si hay nitrógeno en el suelo al momento que lo demanda la planta (sincronización en el sentido definido por Swift, 1984; Mosier *et al.*, 2004; Machado *et al.*, 2010a) sino también si este nitrógeno está en un lugar del suelo donde sea accesible para las raíces de la planta. Para describir la coincidencia espacial entre la disponibilidad de nitrógeno y la presencia de raíces se ha acuñado el término de sinlocación, obteniéndose evidencia experimental de que en algunos cultivos es un aspecto esencial del rendimiento que puede ser manipulado a partir de prácticas como la distribución espacial del fertilizante o de las plantas (Myers *et al.*, 1994; Martínez, 2014).

En base a la discusión anterior y entrando un poco al tema del manejo del cultivo, con respecto a la aplicación de fertilizantes, cuando este se aplica en una banda tendría que colocarse más cerca del cormo en las aplicaciones que se efectúan durante la etapa de crecimiento vegetativo y tal como se realizó en las aplicaciones de la etapa reproductiva. En esta última, la banda quedaría bastante central en la parcela y por la dinámica hídrica podría alcanzar tanto las áreas cerca del cormo como las más distantes, ya que como explican Blomme *et al.* (2000) y Belalcázar *et al.* (2005), las raíces tienen la cualidad de orientarse hacia áreas de suelo más fértiles. Cabe también cuestionarse la conveniencia de la aplicación del fertilizante en una banda en vez de otras posibilidades, como al voleo, o en una banda más ancha, lo que reduciría el posible efecto de una alta concentración de fertilizante en un área pequeña sobre las pérdidas por volatilización y lavado y tal vez mejoraría la eficiencia de captura y absorción por parte de las raíces. Otro aspecto a considerar es la incorporación de alternativas para mejorar la capacidad de absorción de las raíces, entre ellas está la inoculación con hongos micorrizógenos arbusculares, rizobacterias entre otros, que en trabajos realizados por Jaizme-Vega y Rodríguez-Romero (2008) y González y Cuenca (2008), en cultivos de banano y plátano respectivamente, presentan resultados satisfactorios con respecto al aumento del desarrollo de la planta, el cual puede ser explicado por una mayor absorción de N, por lo que recomiendan su uso como alternativa para reducir la dependencia de fertilizantes químicos y el impacto sobre el ambiente con el fin de mejorar la sostenibilidad del agrosistema.

#### IV.1.4. Dinámica del nitrógeno en la planta madre, el hijo y la unidad de producción

Se encontraron pocos reportes en la literatura de la concentración de N en los diferentes órganos de la planta de plátano, los estudios se enfocan principalmente a la hoja número tres con fines de diagnóstico nutricional (Rodríguez y Rodríguez, 1997; Ndabamenye *et al.*, 2013). De forma general, un aspecto que llama la atención es que la concentración de nitrógeno de la planta es baja y varía relativamente poco a lo largo del tiempo en relación con otros cultivos, no experimentando una dilución marcada a lo largo del desarrollo, probablemente por la influencia del cormo en las primeras etapas. En ese sentido sólo se observa una leve dilución, que sigue la curva de Greenwood (1990), a partir de los 7 ó 8 Mg.ha<sup>-1</sup> y la dilución en este período sólo va de 2,12% a 1,18%. La concentración promedio de la planta entera es de 1,53%±0,38%, bastante baja comparada por ejemplo con la del cultivo de papa que cuando está abundantemente fertilizado varía su concentración entre más de 6% a cerca de 1%, con un promedio cercano al 3% (Villa, 2007).

La concentración de N de la hoja y el seudotallo, respecto a la dinámica durante el ciclo del cultivo, presentó similar comportamiento al descrito por Samuels *et al.* (1978), para ambos órganos donde la concentración durante la primera etapa de crecimiento fue mayor y disminuye progresivamente hasta la cosecha, debido al solapamiento y senescencia. Además, se observa que la concentración de la hoja es el doble de la del seudotallo con una concentración de 3,12% para la hoja y 1,88% para el seudotallo (Samuels *et al.*, 1978) comparando con los valores obtenidos fueron 12% y 22% menores respectivamente y dentro del rango reportado de 1,49 a 3,11% para banano por Ndabamenye *et al.* (2013).

La dinámica del N, en la planta está asociada a la acumulación de materia seca, con una baja acumulación durante la etapa de crecimiento vegetativo, se incrementa hasta alcanzar el máximo durante la floración y mantenerse casi constante en el llenado del racimo, patrón descrito por Belalcázar *et al.* (1999) para el clon Dominico Hartón, tal como se observó en todos los órganos que fue la misma que presentó la acumulación de biomasa de cada órgano, alcanzando los máximos valores alrededor de la emergencia de la bellota, pero se diferencia que luego del máximo el N disminuye pronunciadamente hasta la cosecha y por el contrario se incrementa en el racimo, tal como lo señalan Castillo *et al.* (2011) y Samuels *et al.* (1978) que menciona que esta disminución es debida probablemente al movimiento de los nutrientes desde las hojas y el seudotallo al racimo, como se observa en las tasas translocación calculadas en este estudio. En base a la dinámica de absorción de nitrógeno observada, podemos dar respuesta al segundo

aspecto considerado en la pregunta 1, sobre la importancia de la retranslocación de N para el llenado de los frutos y para los hijos ya que alcanza el 55,47 % y el 14,30% respectivamente del total acumulado por la planta.

Así mismo, podemos responder la pregunta de investigación 3 sobre la aplicación de fertilizante y la sincronización con la demanda de la planta durante el ciclo del cultivo. La planta acumula en la etapa de crecimiento vegetativo, aproximadamente el 50% del N y en la etapa reproductiva el restante 50%, además, se determinó que entre los 90 y 180 DDS se acumula el 77% del total de N de la planta y con el esquema de aplicación ejecutado, que es el aplicado en la zona, se aplicó el 66% del N en la primera etapa y el 33% en la segunda, lo cual no sigue la demanda de la planta. Por ejemplo, la primera aplicación de fertilizante, realizada a los 65 DDS, fue alta dado que la cantidad acumulada por la planta en el muestreo siguiente alcanzó el 9% del máximo acumulado por la planta. Así mismo la aplicación del fertilizante no toma en cuenta la distribución del sistema radicular en el suelo, lo que determina que durante la primera aplicación las raíces no tienen suficiente alcance y luego la tercera aplicación se realiza en raíces poco activas desde el punto de vista de la absorción de nutrientes y agua. Por tanto, se tendría que efectuar una reprogramación de la frecuencia de aplicación que se efectúa en la zona. En este sentido planteamos realizar las aplicaciones en la Hoja 5 con un 5% de la dosis total, en la H10 el 15%, en H15 el 30%, en H20 el 30% y la última aplicación en H30 con el 20%, de esta forma se estaría siguiendo la curva de absorción y equilibrado de la dosis de N en la etapa de crecimiento y colocar el fertilizante siguiendo el crecimiento horizontal de las raíces.

Con respecto a la curva de dilución y el índice de nutrición de nitrógeno (INN), propuestos inicialmente por Greenwood y Barnes (1978) y luego por otros autores como señala Greenwood *et al.* (1990), para plantas C3, tales como alfalfa, pasto, repollo, trigo, canola y papa, que presentan características entre ellas diferentes, pero con similitudes en la relación entre el %N crítico y el peso de la planta y que se ajustan a un modelo general. Adicionalmente, Greenwood *et al.* (1991), plantea que la curva de dilución dependiendo del cultivo, se debe usar a partir de 1 ó 2 Mg.ha<sup>-1</sup>, en este punto Justes *et al.* (1994) concuerda con Greenwood y propone en trigo, el valor de 1,5 Mg.ha<sup>-1</sup>.

Específicamente para el cultivo de papa, Machado (2005) empleó la ecuación propuesta por Greenwood *et al.* (1985) y el INN, para detectar diferencias entre tratamientos de fertilización, con buenos resultados.

En nuestro caso, el plátano presenta características muy diferentes a las plantas originalmente empleadas para la elaboración del modelo general, principalmente por su sistema de reproducción vegetativa, por lo tanto, como se mostró en los resultados, este cultivo no presenta una curva de dilución típica, con una disminución continua del contenido de nitrógeno a medida que aumenta la biomasa. Carran *et al.* (2007), indican que varios autores llegan a la conclusión que estas curvas pueden llegar a ser únicas para genotipos de una especie o grupo de especies. Thieuleux (2006), para plantas de banano provenientes de cultivo in vitro, presenta una curva de dilución con valores por debajo a la curva de Greenwood durante todo el primer ciclo, sin embargo, el comportamiento obtenido para materia seca  $<2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , es similar al nuestro, con valores de N (2,2%) ligeramente superiores a los obtenidos en este trabajo (1,8%). Dorel *et al.* (2008), en el modelo de simulación propuesto para banano, soluciona esta limitación indicando que para pesos de la planta menores a  $2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , el contenido de N es de 4% y si es superior sigue la ecuación propuesta por Greenwood *et al.* (1990). Por el contrario, en este trabajo para poder utilizar el enfoque de Greenwood *et al.* (1990), fue necesario adaptar la curva de dilución diferenciando una primera fase durante la cual aumenta levemente el contenido de N y que está por debajo del porcentaje propuesto por Dorel *et al.* (2008), y una segunda fase en la que disminuye, pero globalmente se mantiene el contenido de N relativamente constante y sigue la curva propuesta por Greenwood.

Sin embargo, esto no invalidaría la posibilidad de utilizar la curva para calcular el INN, que en nuestro caso indicó que el cultivo no estuvo sometido a stress de nitrógeno y eventualmente presentó valores por encima de uno, que según Mariño *et al.* (2004), desde un punto de vista agronómico, es considerado un consumo de lujo. Colnenne y Meynard (1999), concluyen que esta curva y el INN, son herramientas diagnosticas relevantes del nivel de N en los cultivos y pueden ser usadas en diferentes condiciones edafoclimáticas y permiten determinar el efecto de la deficiencia de N y que este conocimiento se puede utilizar en diferentes modelos de cultivo, particularmente, esta curva de dilución puede ser utilizada en el modelo, para calcular la demanda potencial de N y evaluar el nivel de déficit de este elemento, que podrá ser incorporada en la versión que incluirá el ciclo completo del hijo, ya que este presentó un comportamiento consistente con la tendencia experimentada con la madre, durante el período evaluado.

En síntesis podemos decir que el análisis del crecimiento y del contenido de N en las plantas de plátano, desde la siembra hasta la cosecha de la planta madre, nos permitió evidenciar los profundos cambios que experimenta la planta a medida que crece y asigna asimilados en

forma diferencial a sus distintos órganos y al hijo. Como resultado es posible diferenciar claramente una serie de etapas de desarrollo que se inician con una planta dependiente completamente del cormo, que es una estructura vegetativa grande pero pobre en nutrientes, que impone una primera fase de crecimiento muy lento o decrecimiento. No es hasta que la planta desarrolla sus primeras hojas y raíces que empieza a aumentar su biomasa total y a no depender completamente de los asimilados del cormo y sólo entonces es que comienza una fase más rápida de crecimiento. También se pudo observar el balance entre la biomasa asignada a la madre y la asignada al hijo, donde se observa claramente que el hijo comienza y permanece durante bastante tiempo como una estructura subterránea, que aparece muy rápidamente, y que es durante mucho tiempo dependiente de la madre. Al cosechar el racimo queda un hijo de tamaño considerable y que ya ha equilibrado su biomasa aérea con la subterránea, y que tardará mucho menos que la madre en cumplir con el resto de sus etapas de desarrollo. Vimos cómo la planta mueve sus asimilados y nutrientes entre sus órganos, de acuerdo a un claro patrón temporal. Todos estos aspectos plantean la necesidad de incorporar en el modelo de simulación un patrón de distribución de los asimilados entre los órganos y entre los vástagos (madre, hijos, nietos) que varía continuamente a lo largo del desarrollo. Todo este patrón temporal está asociado a una ocupación progresiva del espacio aéreo y subterráneo, donde sólo durante los primeros meses se mantiene una cobertura baja y luego al cosechar la planta madre, el hijo genera cierta continuidad en el uso de los recursos. Queda planteado para investigaciones futuras y como aspecto importante a incorporar en los modelos: a) ¿cómo continua el patrón de asignación de la biomasa después de la cosecha de la planta madre? y b) ¿cómo influye el déficit de nutrientes o de agua en dicho patrón?, c) también es necesario hacer una validación de la modificación propuesta a la curva de dilución de Greenwood.

Con respecto al compartimiento de los hijos extra y la práctica del deshije, en la literatura consultada se hace referencia al efecto del número de hijos sobre el crecimiento y el rendimiento de la planta madre tanto en banano y plátano con el consenso de que al aumentar el número de hijos el crecimiento y el rendimiento disminuye por lo que fundamentalmente dependiendo del sistema de producción se deben mantener como máximo tres hijos (Obiefuna *et al.*, 1983; Govea, 1991; Odeke *et al.*, 1999; Oluwafemi *et al.*, 2013; El Fatih *et al.*, 2014), además, Vargas *et al.* (2005) y Rosales *et al.* (2008) indican para plantaciones en sistemas intensivos, el deshije es importante para podar la parte aérea de todos los hijos, para que los cormos contribuyan al anclaje de la unidad de producción, pero lamentablemente no se aclara que otras funciones pueda cumplir este

compartimiento, que justifique mantener una estructura tan grande, por lo que queda pendiente por investigar.

El RUE máximo obtenido fue de aproximadamente  $5 \text{ g.MJ}^{-1}$  y el valor promedio durante el desarrollo del cultivo fue de aprox.  $3 \text{ g.MJ}^{-1}$ . Ritchie *et al.* (1998) presentan valores de RUE potencial para seis cereales que están entre 3,5 y  $5 \text{ g.MJ}^{-1}$ , lo cual está en el mismo orden del RUE obtenido para plátano. Asimismo estos autores señalan que a mayor PAR menor es el RUE para un mismo cultivo. Villa (2007) reporta para un cultivo de papa bien fertilizado valores de RUE que van de 4,4 a  $1,8 \text{ g.MJ}^{-1}$ , descendiendo a medida que se desarrolla el cultivo y disminuye el nitrógeno foliar. Valores que también están en el rango de variación encontrado para el plátano aunque un poco por debajo. En caña de azúcar, Muchow *et al.* (1994) reportan un RUE de  $1,75 \text{ g.MJ}^{-1}$ . En base a estas comparaciones pudiéramos afirmar que el cultivo de plátano, bajo las condiciones del estudio, presentó valores de RUE iguales o mayores que los reportados para otros cultivos que pueden presentar mayores producciones.

En relación a la pregunta de investigación número 2, referida a la eficiencia de intercepción de la luz del cultivo de plátano en la región de sur del lago de Maracaibo, podemos indicar que, el LAI máximo alcanzado por el cultivo fue de 2,81 considerando la unidad de producción, mientras que el valor medio fue de  $1,41 \pm 1,02$ . Estos son valores bastante bajos si se comparan con otros cultivos o ecosistemas naturales. Por ejemplo, en papa Machado (2005) obtuvo valores máximos en el orden de 3 y en manzano llega hasta 7 (Galán y Robinson, 2013). Sin embargo, para las musáceas, Muñoz-Carpena *et al.* (1999) para banano presenta valores entre 0,5 a 4 dependiendo del estado fenológico y Turner (1972), Jiménez y Lhomme (1994), Nyombi (2010) y Galán y Robinson (2013) presenta para bananos y plátanos valores entre 2,67 a 5,1, donde el último autor refieren que el LAI varía de un lugar a otro, según la densidad, la estación del año y otros factores climáticos y el clon, en base a este comentario y con estos datos se trató de efectuar un análisis con la densidad (desde 1111 a 2100 plantas. $\text{ha}^{-1}$ ) y la altura del lugar (54 a 1390 msnm) pero no se obtuvo una relación concluyente, sin embargo, considerando la densidad de este estudio el valor obtenido dentro del grupo de las musáceas es bajo. Como consecuencia del bajo LAI, la radiación interceptada fue baja, con un promedio diario durante todo el desarrollo la unidad de producción de  $42\% \pm 27\%$  y un valor máximo de 73% cuando la unidad de producción alcanzó la mayor área foliar. En total la PAR incidente acumulada fue de  $2092 \text{ Mj.m}^{-2}$ , de la cual la madre interceptó 717 (35%) y el hijo 73 (4%), quedando el 61% de la PAR sin interceptar. En este

particular, Jiménez y Lhomme (1994), reportan 66% de intercepción (27% más que en este estudio) producto de los valores mayores en el LAI que los nuestros. Esto se debe a la conjugación de dos factores, por un lado el bajo LAI y por otro el bajo coeficiente de extinción de la luz resultado del ángulo bastante vertical que adquieren las hojas (Nyombi, 2010), que nos muestra que la intercepción de la luz por el follaje del cultivo es poco eficiente, por lo que habría que explorar alternativas para aumentarla por ejemplo con cultivos intercalados o el aumento de la densidad de siembra. Por otro lado, la práctica del deshoje por efecto de la enfermedad Sigatoka negra es un factor que interviene directamente reduciendo la capacidad de la planta de interceptar mayor cantidad de luz.

#### **IV.2. Balance hídrico del agroecosistema plátano**

Cuantificar los principales flujos que integran el balance hídrico es la herramienta clásica para la determinación del movimiento de agua por los ecosistemas, en este caso para el agroecosistema plátano, permitiendo identificar períodos de exceso o déficit de agua para los cultivos. Así mismo, el balance nos informa cuales pueden ser las vías posibles de pérdidas de nutrientes o la susceptibilidad del agroecosistema a la erosión, lo que permite adaptar o corregir aspectos del manejo agronómico. Un aspecto importante del balance hídrico es el efecto que ejerce la cubierta vegetal, la cual intercepta parte del agua que ingresa como lluvia y causa una redistribución de la misma a nivel de la superficie del suelo. Procesos hidrológicos, como la infiltración y la escorrentía están sujetos a esta redistribución, la cual determina la cantidad de agua que llega al suelo y genera posibles efectos negativos sobre el ambiente (Cattan *et al.* 2007a). En este trabajo, la información del balance hídrico era indispensable, ya que no existía en la zona datos que permitieran realizarlo y además resultaba necesario para establecer el balance de nitrógeno y la información obtenida permitió plantear la estructura del modelo de simulación con los principales flujos y su calibración.

En este punto y en vista a los resultados obtenidos en los flujos hídricos, se plantea la pregunta ¿Puede haber déficit hídrico con una precipitación anual de 2200 mm distribuida de forma relativamente uniforme en el año?, considerando lo planteado por Rosales *et al.* (2008) que indican la demanda hídrica anual del plátano en 2000 mm, Akinro *et al.* (2012), estiman el consumo de agua en un rango de 900 a 1700 mm y Belalcázar (1991) en niveles de 150 mm.mes<sup>-1</sup> de precipitación, se puede indicar que tomar la precipitación como referencia para estimar el

suministro de agua para el cultivo no es muy bueno, ya que como veremos más adelante, la cantidad de agua que cae por precipitación, no necesariamente es la que se infiltra y está disponible para el cultivo.

#### IV.2.1. Los flujos hídricos

##### Precipitación total

La precipitación total registrada durante el período de estudio superó los promedios mensuales y anual de los registros históricos de la Estación Local Chama desde 1995 al 2012 (Figura II-2 y II-3), lo que indica que fue un período excepcionalmente húmedo, lo cual pudo haber aumentado la magnitud de los flujos de salida y concomitantemente las pérdidas de nutrientes, aunque por otro lado debe haberse minimizado el posible déficit hídrico. Siendo la precipitación total anual y también los promedios mensuales altamente variables, el funcionamiento ecohidrológico del sistema es heterogéneo en el tiempo y el cultivo puede verse sometido en años sucesivos a condiciones diferentes que marquen años más secos o más húmedos. Este es uno de los problemas de generalizar los resultados de una investigación realizada en un año particular y es por esto que a veces es más importante conocer las relaciones entre los procesos que las magnitudes en sí mismas y de allí también la gran utilidad que puede tener un modelo para la extrapolación o generalización de resultados puntuales.

Vale la pena recalcar algunos aspectos interesantes de la precipitación antes de pasar a discutir los demás flujos, en este sentido llama la atención:

- La importante variabilidad interanual frente a una variabilidad mensual baja: Siendo el clima del sur del lago característico de la selva húmeda tropical, es decir, sin meses secos o con un máximo de dos meses secos por año, es de esperar que la precipitación presente una menor variabilidad entre los meses que en otros ambientes. Por otro lado se observa en la zona una variabilidad anual importante en el monto de la precipitación.
- Las altas precipitaciones: Independientemente de la variabilidad y las tendencias es evidente que esta zona se caracteriza por montos altos de precipitación. Por lo tanto, la primera suposición es que no hay limitaciones hídricas para el crecimiento del cultivo.

##### Precipitación neta e intercepción

Como es de esperarse este flujo describe el patrón de la precipitación total, debido a que está dominado por el flujo de goteo+caída directa, siendo el flujo caulinar de menor importancia.

El flujo de goteo+caída directa el cual está afectado por el estado de desarrollo de la planta, con un valor máximo (90% de la precipitación total) y un valor mínimo (80% de la precipitación total), como indican Jiménez y Lhomme (1994), en plátano Hartón establecido, el flujo de goteo en promedio fue de 78% de la precipitación total, valor apenas un poco menor al obtenido, sin una relación clara con la magnitud y la intensidad de la precipitación.

En base a lo anterior, este es un sistema con niveles de precipitación total altos, por lo que el valor porcentual de la intercepción es pequeño, no existiendo mucha diferencia entre la precipitación total y la neta. Sin embargo, en valor absoluto, la intercepción puede alcanzar hasta 4,5 mm diarios, lo que muestra la alta capacidad del follaje de este cultivo de retener agua y puede ser importante no tanto por su volumen sino por las implicaciones en la predisposición al desarrollo de la Sigatoka negra (Jiménez y Lhomme, 1994) y en el cálculo de la evapotranspiración (Echeverría, *et al.*, 2007). La intercepción, en este estudio está en el nivel reportado para este clon de 1,9 mm y no presentó relaciones significativas simples con la precipitación o el área foliar de la planta, como indican Jiménez y Lhomme (1994) en plátano Hartón y Cattán *et al.* (2007a) en banano. Además refieren que esta falta de relación, se debe a la dinámica de la capacidad de almacenamiento de las hojas y su evaporación, dado que para eventos de lluvia equivalentes y con frecuencia corta, pueden ser bastante variable, probablemente depende de las condiciones de humedad previa del dosel y la velocidad del viento.

La pregunta de investigación 4, referida a la importancia del dosel en la redistribución del agua de lluvia se responde con la siguiente discusión de los flujos de goteo+caída directa y flujo caulinar. Se analizó la distribución espacial del agua que llega al suelo a través del flujo por goteo+caída directa, obteniendo que la magnitud de la precipitación y el área foliar, no afectan la distribución del agua sobre la superficie del suelo, lo que sugiere que la arquitectura de la planta y la forma de la hoja ejercen mayor influencia, como se observa en las figuras III-18, 19 y 20, que indican la existencia de un patrón de distribución de la lluvia sobre el suelo; por tal razón, la mayor cantidad de agua se localiza alrededor de los 37 cm desde la base de la planta y en los bordes del área que cubre una planta, que ocasiona una alta heterogeneidad en la llegada de agua al suelo, que pueden ser tan grande que algunos sectores reciben hasta 3500 mm en el período de 10 meses (más que la precipitación), mientras que otros reciben alrededor de 500 mm, lo cual puede influir en los procesos edáficos, creando condiciones de saturación o sequía, estimulando o inhibiendo algunos procesos biológicos, que habría que continuar analizando en estudios posteriores, para determinar cómo afecta esto en la distribución del agua en el perfil y en los

procesos ecológicos del suelo. Cattan *et al.* (2007a) en banano, reportan que al igual que en este estudio, aparecieron puntos de goteo con alta tasa de precipitación, la diferencia es que éstos se presentaron entre las hileras y la distribución espacial del flujo de goteo, varió de acuerdo a la distancia desde el seudotallo, con un área de 50 cm desde el seudotallo que presentó menor volumen de precipitación incidente, por lo tanto en este trabajo, se da información más detallada de cómo se distribuye el agua que llega al suelo por este flujo.

El flujo caulinar, es una parte pequeña de la precipitación neta, afectado positivamente por la precipitación total, que alcanzó sus valores máximos al alcanzar la planta el índice de área foliar máximo. Similares resultados obtuvieron Cattan *et al.* (2007a) en banano, quienes indican que las diferencias de este flujo entre estados fenológicos de la planta, se pueden explicar por variaciones en LAI y otras características de la arquitectura del follaje de la planta. Estos autores, explican esta relación por el tamaño y las posiciones que presentan las hojas durante el proceso de emisión foliar, por ejemplo, la hoja candela presenta en sus últimos estados de desarrollo, forma de embudo y las cuatro primeras hojas son más erectas que las hojas posteriores, lo que canaliza mayor cantidad de agua hacia el seudotallo, como fue confirmado por Bassette y Bussiere (2008), que indican que la inclinación de la hoja en las bananas influye directamente en el salpique de las gotas de agua y su capacidad de almacenamiento que afecta directamente a este y los demás flujos relacionados.

#### Escorrentía

El principal flujo de salida obtenido para el agroecosistema plátano fue la escorrentía, la cual sigue, al igual que el goteo+caída directa, el patrón de la precipitación, con un promedio mensual del 55% de la precipitación mensual, que a pesar de las bajas pendientes (1%), contrasta con el rango de 0,6 a 40% obtenido de trabajos presentados para diferentes agroecosistemas y sistemas naturales (Roose, 1981; Acevedo y Sarmiento, 1990; Ataroff y Sánchez, 2000 y Sarmiento, 2000). Esto implica que sumado a la intercepción, la cantidad de agua que se infiltra en el suelo es bastante menos de la mitad de la que entra por precipitación. En este caso, la infiltración, fue afectada por la cobertura del suelo producida por la hojarasca del cultivo, debido a la dinámica observada en sus valores (figura III-16) y como refieren Ruy *et al.* (2005), Cattan *et al.* (2007ayb; 2009) y Sansoulet *et al.* (2007), la redistribución de la lluvia por el follaje de la planta favorece la escorrentía.

La alta escorrentía obtenida en este estudio se podría probablemente explicar por la humedad del suelo que a lo largo del ciclo del cultivo permaneció en valores cercanos a la capacidad de campo en las dos capas, la fluctuación del nivel freático y sobre todo la baja conductividad hidráulica (resultados preliminares no presentados). Estos factores pudieron influir en un lento movimiento de entrada del agua al suelo.

#### Drenaje:

El bajo drenaje obtenido, en consecuencia, disminuye el potencial de lavado de nutrientes del suelo, mantiene un reservorio de agua para el uso de las plantas y mantiene la actividad biológica del suelo, como se observó en la calicata realizada en la parcela.

En comparación con otros estudios, el drenaje estimado puede considerarse como muy bajo. Por ejemplo, Ruy *et al.* (2005) y Cattán *et al.* (2007b) en banano, obtuvieron un drenaje alto y constante en este agroecosistema, motivado a las altas precipitaciones y la redistribución que hace el follaje de las plantas, en concordancia a lo que indica Roose (1981), que este flujo es influenciado por la vegetación, el tipo de suelo y la distribución de las lluvias.

En base a información general que presenta Kijewski *et al.* (1981) estos suelos presentan buenas condiciones de drenaje interno y Márquez *et al.* (1982), indican niveles freáticos altos que fueron corroborados en la calicata realizada y las observaciones durante el desarrollo del trabajo de campo, las explicaciones pueden estar orientadas hacia la débil estructura del suelo que propicia procesos de compactación, dadas las características granulométricas, especialmente del tamaño de las partículas de arena y la historia de uso de la parcela, que ocasionaría un sellado superficial del suelo, impidiendo mayor entrada del agua de lluvia y que luego puede ser acentuado, como ya se explicó por la arquitectura del cultivo y la acumulación de hojarasca en favor de la escorrentía. Otras explicaciones se orientan a la capacidad de retención del agua y la baja tasa de infiltración y conductividad hidráulica o la falta de canales preferenciales de flujo de agua en el suelo, generados por el sistema radicular de esta especie, principalmente en la zona alrededor del cormo, pero son aspectos que se tendrán que analizar en otros trabajos.

Estos aspectos, son muy importantes, ya que sugieren que el agua realmente disponible, para la transpiración de los cultivos, que puede alcanzar entre 1800 a 2500 mm.año<sup>-1</sup> (Cayón, 2004; Rosales *et al.* 2008), es mucho menor de la que se podría inferir por la altísima precipitación de la zona. En el período de estudio, de los 2163 mm precipitación sólo se infiltraron 922 mm, por lo que, aunque parezca contraintuitivo, podríamos tener déficit hídrico en el cultivo, pero dado los

niveles de agua en el suelo y el posible aporte del agua subterránea, el cual no fue cuantificado, probablemente el déficit hídrico fue limitado.

La discusión anterior de los resultados de los flujos hídricos, permite dar respuesta a la pregunta número 5 sobre la importancia relativa de los mismos. En este sentido, contrariamente a lo que suponíamos inicialmente, el flujo más importante en magnitud resultó ser la escorrentía y no el drenaje. Esto pudiera explicar la propensión a las inundaciones en la zona y plantea la importancia de explorar alternativas para reducirla, a través del manejo de los suelos con prácticas orientadas a mejorar la infiltración y control de la erosión, teniendo en cuenta además el nivel freático.

#### IV.2.2. Balance hídrico del agroecosistema plátano

Si bien se han estudiado algunos de los flujos del balance hídrico en el cultivo de banano no hemos conseguido un estudio donde se complete y presente el balance hídrico global, en ese sentido el presente trabajo hace un primer aporte en el análisis sistémico del balance hídrico para el cultivo y la región.

El balance hídrico del agroecosistema presentó en general un comportamiento estable, sin diferencias relevantes durante las diferentes etapas de desarrollo de la planta, como era de esperar por la relativa homogeneidad de las lluvias a lo largo del tiempo. Con respecto a los flujos de salida se puede indicar que siguieron una secuencia de importancia de mayor a menor como sigue: escorrentía > evapotranspiración > drenaje > interceptación, que se puede ordenar en una proporción de 10:6:2:1.

En base a los resultados obtenidos en el balance hídrico, es importante plantearse la susceptibilidad que tendrá este agroecosistema frente al cambio climático. Los escenarios planteados por Martelo (2004), indica que para esta zona de Venezuela para el año 2020, se espera una reducción del 5% de las precipitaciones y un aumento de 0,3 °C en la temperatura y que puede ocurrir una redistribución de los eventos de lluvia que disminuyen y aumentan los días secos y se cree que ocurrirán con mayor frecuencia lluvias intensas, por lo tanto, la redistribución del agua infiltrada y escurrida puede ser muy importante, por el posible déficit hídrico, por el aumento del riesgo de erosión y a su vez la pérdida de suelo. Sin embargo, hay mucha incertidumbre en estos escenarios y las predicciones se presentan con muy poca resolución espacial. En este sentido creemos que es importante seguir analizando la serie climática de la estación experimental y verificar en otras estaciones vecinas la tendencia de estos escenarios.

Desafortunadamente ha ocurrido una merma lamentable en la densidad del sistema de estaciones climatológicas en Venezuela que dificultará el análisis de este fenómeno tan importante. En este mismo sentido, Jarvis *et al.* (2008), indica que entre los países productores de bananos, sufrirán más los tropicales, que tenderán a reducir la producción y los subtropicales serán favorecidos y aumentarán la producción, en promedio en 6% para el año 2050. Los países del caribe experimentaran reducciones significativas de más de 100 mm de la precipitación anual. Específicamente para Venezuela, Jarvis *et al.* (2008), presentan valores de disminución de 16 mm por año en la precipitación anual y un aumento de 2,6 °C en la temperatura, que tendrán como consecuencia una pérdida de la adaptabilidad climática de estos cultivos en las tierras bajas de nuestro país.

Calberto *et al.* (2015), corroboran los escenarios planteados en el párrafo anterior e incorporan una proyección para el 2070, donde indican que el aumento de 3 °C, no afectara la producción global de banano, por la incorporación de áreas subtropicales y tierras altas de los trópicos. Además indican que el ciclo de producción a cosecha podría reducirse debido a una tasa de emisión de hojas mayor, incrementando la demanda de agua entre un 12 a 15%.

En base a los resultados obtenidos en los flujos del balance hídrico y los escenarios, presentados por Martelo (2004), Jarvis *et al.* (2008) y Calberto *et al.* (2015), contamos con argumentos para responder la pregunta de investigación 6, sobre la posibilidad de presentarse déficit hídrico en la zona y afectar las plantaciones de plátano, por lo tanto podemos considerar que el área es altamente vulnerable, ya que las consecuencias de la disminución de la precipitación y el aumento de la temperatura, puede traer rápidamente condiciones de sequía, ya que bajo las condiciones del estudio menos de la mitad de la precipitación se infiltra y la escorrentía producto de los eventos de gran magnitud e intensidad puede incrementar el potencial de la evapotranspiración como refiere Roose (1981); así mismo, un punto importante a considerar son las características del suelo y la superficialidad del sistema radicular que tiene una influencia clave, cuando la separación entre eventos de precipitación por varios días o semanas, puede influir en períodos cortos de falta de agua. También debemos indicar que es necesario realizar estudios puntuales para complementar la información obtenida con evaluaciones de la dinámica del agua en el suelo, requerimiento de la planta y efecto de la cobertura del suelo, para alcanzar una respuesta sólida en este particular.

En este sentido, el modelo que presentamos en la última sección de la tesis, una vez haya completado su proceso de validación, puede resultar en una herramienta importante para evaluar el efecto de diferentes escenarios de cambio climático sobre el desarrollo del cultivo.

#### IV.2.3. Comentario sobre las metodologías utilizadas y perspectivas

Las metodologías utilizadas, sus limitaciones y las perspectivas a tener presentes en futuras investigaciones en esta área del conocimiento, tan necesaria para buscar alternativas de manejo y mejorar la sustentabilidad de los agroecosistemas del sur del lago de Maracaibo.

Desde un punto de vista metodológico, las observaciones más importantes que podemos hacer para mejorar los dispositivos utilizados en la medición de los flujos hídricos son:

- El principal cuidado que se debe tener con el flujo caulinar, es el reemplazo del dispositivo cada tres a cuatro semanas, dado que el engrosamiento y la superficie lisa del seudotallo, hacen que se cierre o se desprenda la manguera que canaliza el agua a los colectores.
- Con respecto, a las parcelas de erosión, en estas condiciones de alta precipitación y características del suelo, la mejor estrategia sería la instalación de tres contenedores de 200 litros acoplados de forma consecutiva (600 litros de almacenamiento para una parcela de 10 m<sup>2</sup>), ya que con tanques más profundos el nivel freático y la presión del agua los eleva a la superficie.
- Es importante recordar que el dispositivo instalado para la medición del drenaje en este trabajo presentó problemas, se sugiere que para la medición de este flujo en estas condiciones, buscar otro método que sea menos afectado por las condiciones ambientales, el tipo de suelo y el nivel freático. Por lo tanto, mediciones de las características de los suelos es una prioridad, para mejorar los criterios de selección de la metodología para la determinación del drenaje. En este sentido, entre las varias opciones reportadas en la literatura, las sondas de capacitancia podrían resultar adecuadas, aportando información no sólo para estimar el drenaje, sino además sobre estrés hídrico, optimización de riegos y la dinámica del agua en el suelo (Arauzo *et al.* 2003).
- Las metodologías probadas aquí pueden ser fácilmente adaptadas a otras plantas y condiciones ambientes similares, siendo en general de bajo costo.

#### Perspectivas

Como prioridades para continuar con esta área de estudio podríamos mencionar:

- Para mejorar el conocimiento del balance hídrico, probablemente el punto más débil del trabajo, fue la medición del contenido de agua en el suelo, la cual sólo se hizo en 12 ocasiones y no

tan frecuente como los otros flujos, se requiere realizar las mediciones a lo largo del tiempo, en diferentes capas de suelo así como analizar la distribución espacial de la humedad del suelo.

- Evaluar el potencial de la concentración de la precipitación en la superficie del suelo, con fines de determinar riesgo de escorrentía y fragmentación de las partículas del suelo.
- Con fines de analizar más regionalmente el flujo de escorrentía, se hace también importante la obtención de información similar en otros tipos de suelo representativos de la zona y otros sistemas de manejo (pastizales, cultivos perennes, anuales o con manejos intensivos del suelo).
- También sería una prioridad de investigación evaluar cómo puede reducirse el flujo de escorrentía y la erosión y el impacto que esto podría tener sobre el balance de nutrientes. Algunas posibilidades podrían ser la modificación de la estructura de la superficie del suelo a través de zanjas de infiltración, el aumento de la materia orgánica para aumentar la velocidad de infiltración, la utilización de mulch que absorba el agua, la utilización de barreras a la escorrentía en forma de líneas de pastos densos, etc.
- Otra área importante a investigar serían las prácticas agroecológicas, que podrían aumentar la cobertura del suelo, ya sea por un aumento de la densidad o a través de policultivos y de esta forma modificar los flujos hídricos.
- Queda también pendiente poner a prueba una metodología apropiada para cuantificar el flujo de drenaje.

### **IV.3. Ciclado de nitrógeno del agroecosistema plátano**

El ciclo del nitrógeno en los agroecosistemas es de particular interés, tanto desde el punto de vista del manejo agronómico y la sustentabilidad de la producción, como desde el punto de vista de los impactos ambientales locales, regionales y globales (Dobermann y Cassman, 2004). Dado los diferentes procesos involucrados, son pocos los casos en que se logra estudiarlos todos en un mismo trabajo.

En nuestro caso se intentó establecer un balance de nitrógeno lo más completo posible, para conocer las particularidades del movimiento del N en un cultivo de plátano a través del ciclo del cultivo en el Sur del Lago de Maracaibo. Inicialmente se había planteado la posibilidad de utilizar fertilizante enriquecido con el isótopo  $^{15}\text{N}$ , pero por razones logísticas, analíticas y de costo, ese análisis no fue posible efectuarlo. No se planteó medir la entrada por fijación biológica, ni la pérdida por desnitrificación y la salida a través del flujo de drenaje no se pudo medir, por lo tanto

este último flujo fue estimado. Otros procesos que no se analizaron, fueron la mineralización de los residuos del cultivo y la inmovilización en la biomasa microbiana. Así mismo, no pudo ser estudiado en detalle, la distribución del nitrógeno mineral del suelo en relación a la distribución de las raíces. Esta limitación, se destacó en el momento de la modelización, dado que la aplicación del fertilizante se realiza en una banda bien delimitada alrededor del seudotallo, es de esperar que se produzca una variabilidad espacial en la concentración de nitrógeno mineral, que puede influir negativamente en la eficiencia de absorción de las raíces y potenciar algunas pérdidas gaseosas y por lavado, al crear zonas de suelo con concentraciones muy altas de N. A pesar de estas limitaciones, el estudio permitió tener una visión bastante completa de cómo es el ciclado de nitrógeno en este agroecosistema. Algunos de los procesos faltantes podrían ser objeto de estudios posteriores.

#### IV.3.1. Características del balance de nitrógeno del agroecosistema plátano.

Del balance de nitrógeno y las comparaciones efectuadas, se logró establecer los siguientes aspectos resaltantes en los flujos evaluados:

##### IV.3.1.1. Transformaciones químicas del N del agua a medida que atraviesa el agroecosistema.

Un aspecto muy claro en los resultados obtenidos y que a continuación se comparan con otros trabajos, son los cambios en la química del N del agua a medida que ésta se mueve en el agroecosistema, cambiando la concentración y las formas minerales dominantes.

La concentración de nitrógeno en la precipitación de este estudio, está en el rango de 0,11 a 1,32 presentado para diferentes ecosistemas naturales y agroecosistemas (Steinhardt y Fassbender, 1979; Infante *et al.*, 1993; Oyarzún *et al.*, 2002 y Tesón (2011). La concentración de las formas de N, presentó un comportamiento con predominio del amonio sobre el nitrato como indican Oyarzún *et al.* (2002), López-Hernández *et al.* (2005) y Pírela *et al.* (2006), pero diferente con respecto a Tesón (2011) y Zaltauskaite *et al.* (2011), en este caso el amonio presentó tres veces mayor concentración que el nitrato.

Steinhardt y Fassbender (1979) y López-Hernández *et al.* (2005), señalan que estos niveles de amonio en la precipitación, pueden ser el producto de varios factores como la cercanía al mar que en este caso sería el lago de Maracaibo, la quema de gases de la extracción petrolera en el lago de Maracaibo y áreas del Caribe o la actividad agrícola y pecuaria en la zona que induce pérdidas de N como amoníaco y que pueden ser reciclados por la lluvia (Oyarzún *et al.*, 2002; Ponette-González *et al.*, 2010).

Adicionalmente, la deposición anual obtenida de  $10,9 \text{ KgN.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ , está en el rango de 4,8 a  $35,4 \text{ KgN.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ , reportado para áreas tropicales (Steinhardt y Fassbender, 1979; Infante *et al.*, 1993; Jaramillo-Robledo, 2005 y Pírela *et al.*, 2006).

La concentración de nitrógeno en el flujo de goteo+caída directa se modifica en relación a la del agua de precipitación, principalmente por un aumento en la concentración de nitratos indicando el efecto del pluviolavado foliar. En este flujo el amonio presentó 2 veces mayor concentración que el nitrato, similar a la reportada por Infante *et al.* (1993), de 1,6 veces, muy diferente a la reportada por Tesón (2011) que fue de 3 veces el nitrato con respecto al amonio.

Igualmente ocurre con el goteo+caída directa anual donde Grimm y Fassbender (1981), Infante *et al.* (1993) y este trabajo de 8, 14 y  $13 \text{ KgN.ha}^{-1}$  respectivamente, son bajas comparadas con un estudio en Costa de Marfil con  $81 \text{ KgN.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  (Grimm y Fassbender, 1981) y superiores a los valores presentados por Ponette-González *et al.* (2010) de 2 a  $6 \text{ KgN.ha}^{-1}$ .

Otro aspecto importante de mencionar en este punto, es el pluviolavado o absorción por la planta, para el cultivo de caña de azúcar, Infante *et al.* (1993), indican que la entrada de amonio por precipitación, fue mayor que la obtenida por el goteo y junto a Ponette-González *et al.* (2010) para bosques y café, estiman una retención por el bosque y los cultivos de más de la mitad, que según los autores puede considerarse como una fertilización natural. También indican, una relación positiva entre el nitrato lavado y la edad de las hojas de la planta, ya que al envejecer se hacen más susceptibles a pérdidas por lavado como señala Marschner (1997). El comportamiento obtenido para el cultivo de plátano fue diferente ya que el goteo+caída directa en el mes de noviembre y luego cerca de la cosecha presentó retención de N y en los meses intermedios, pluviolavado, en cantidades similares a las reportadas por estos autores, concordando con lo señalado, con respecto a la relación del pluviolavado de N con la edad de las hojas de la planta.

El flujo caulinar, presentó concentraciones de las formas de nitrógeno, de 1,5 veces mayor el amonio con respecto al nitrato y similar a lo mostrado por Tesón (2011) de 2,2 veces. Estos resultados, indica una tendencia decreciente de la concentración de nitrógeno a medida que atraviesa el dosel de las plantas de eucalipto, indicando que pudo deberse a la absorción por el dosel. Sin embargo en nuestros resultados, observamos que ocurrió lo contrario aumentó la concentración por lo que se experimentaría pluviolavado de N (Tabla III-19).

La concentración de las formas de nitrógeno en la escorrentía es muy diferente, comparada con los flujos anteriores, predominando el nitrato sobre el amonio por un factor de 1,8, similar comportamiento mostro Tesón (2011) de 1,5 veces. Sansoulet *et al.* (2007), para

banano en las Indias francesas, presentó un valor de N en la escorrentía de  $6 \text{ Kg.ha}^{-1}$  para un período de 77 días, que es superior con la obtenida en este estudio de  $18 \text{ Kg.ha}^{-1}$ , en un período de 293 días, producto de la mayor cantidad de precipitación y escorrentía en menor tiempo medida por estos autores.

Las pérdidas de N, en los flujos hídricos reportada por Jaramillo (2003), en café con diferentes sombras y a plena exposición solar, presentan valores en la precipitación y el goteo de 12 y 5 veces mayores y con respecto a la escorrentía, son 2 veces menores a las obtenidas en este estudio, lo que indica que la dinámica de los nutrientes es afectada por las especies consideradas (Beer *et al.*, 1998; Ponette-González *et al.*, 2010).

En este sentido, en el agroecosistema plátano, el flujo que mayor incide en la pérdida de N por escorrentía es el goteo+caída directa y no el flujo caulinar, básicamente por la magnitud de los eventos de lluvia, que hacen que ocurra una concentración del agua en la banda de fertilización, a diferencia de lo reportado por Muñoz-Carpena *et al.* (2002), Cattán *et al.* (2007b) y Sansoulet *et al.* (2008), entre otros que dan mayor importancia al flujo caulinar.

A pesar de que el valor obtenido de pérdida de N por escorrentía es superior a los de otros sistemas, llama la atención que pese a la altísima escorrentía que caracterizó el balance hídrico y contrariamente a lo esperado, las pérdidas de nitrógeno por esta vía fueron relativamente pequeñas. Se esperaba que la forma de aplicación del fertilizante en la superficie del suelo, potenciara las pérdidas por escorrentía. Sin embargo, la concentración de N en el agua de escorrentía como se observó fue baja. Pareciera que de alguna manera el fertilizante aplicado a la superficie penetrara en el suelo rápidamente o de alguna forma es protegido de ser lavado por el proceso de escorrentía, perdido por volatilización o pudiera perderse por desnitrificación, aspectos que ameritan sin duda más investigación.

Las pérdidas y concentración de N en el drenaje, estimados por nosotros, a través del modelo y considerando que la concentración de nitrógeno en el agua de drenaje es la misma que la de la segunda capa del suelo y que se lixivia solo el nitrato, están en el rango presentado por Flores (1996) de 3,34 a  $17,55 \text{ mg.l}^{-1}$ , similar al presentado por Muñoz-Carpena *et al.* (2002) de 202 a  $218 \text{ Kg.ha}^{-1}$  y son superiores a las reportadas por Suárez *et al.* (2003) de  $125 \text{ Kg.ha}^{-1}$  todos para banano. Por lo tanto, a pesar del bajo drenaje estimado para el agroecosistema, se calcularon pérdidas potenciales altas de nitrógeno por esta vía, que lo posicionaron como la principal salida de N. Por esta razón, la suposición de tomar las concentraciones de nitrato de la capa dos, para estimar las pérdidas por drenaje no se aleja mucho de la realidad, pero se debe evaluar con datos

directos de este flujo tomados localmente, ya que como mencionan Velazco *et al.* (2009), la concentración simulada está por encima de la concentración de nitratos ( $10 \text{ mg.l}^{-1}$ ) permisible, establecida por las normas de la Agencia de Protección Ambiental, la Organización Mundial de Agua de Consumo Humano y el Decreto 883 que regula este tema en Venezuela.

En resumen, como se ha mostrado, en el agua de lluvia predominan las formas amoniacales, lo mismo en la precipitación neta, tanto la que llega por el flujo caulinar como la que llega por goteo desde el follaje más la directa. El paso a través del follaje tiene como consecuencia algunos cambios en la concentración, que están influenciados por el estado nutricional y la edad de las plantas. Los cambios más profundos en la composición del agua ocurren cuando esta entra en contacto con el suelo, donde ocurre un cambio en las proporciones de las dos formas minerales, comenzando a aumentar las formas nítricas y luego en la solución del suelo, donde el nitrato es la forma dominante. Esto último a pesar de que el fertilizante se agregó en forma de urea, la cual al hidrolizarse libera amonio.

Se deduce que el cambio más radical que experimenta el agua de lluvia en su paso por el agroecosistema, parece ser producto del proceso de nitrificación del amonio, que puede ocurrir rápidamente dado las condiciones de campo. Como indica Videla *et al.* (2004), en similares condiciones de humedad y pH del suelo ácido, el potencial de nitrificación parece ser muy elevado, planteamiento similar efectúan para suelos tropicales Montaña y Sánchez-Yáñez (2014), que mencionan igualmente a la humedad, el carbono orgánico del suelo y adecuados niveles de  $\text{NO}_3^-$  y la actividad de los microorganismos como activadores de este proceso. Esto posiblemente tiene importantes consecuencias a nivel del ciclo de nitrógeno, ya que el nitrato es más susceptible de perderse que el amonio, principalmente por lavado y también por desnitrificación.

#### IV.3.1.2. Absorción de nitrógeno por parte del cultivo

La unidad de producción del plátano, presentó una alta absorción de nitrógeno que equivale a cerca del 80% del fertilizante agregado, sin embargo, producto de la dinámica de desarrollo de la planta y del manejo, una parte importante del nitrógeno absorbido retorna al suelo en forma de necromasa aérea. A un resultado similar llega Thieuleux (2006) en banano, donde los residuos del cultivo a la cosecha en el primer ciclo, alcanzan una cantidad equivalente a la dosis de fertilizante aplicada. Esto concuerda con el planteamiento de que la planta de banano y plátano tienen altos requerimientos de nitrógeno (Prasertsak *et al.*, 2001; Sansoulet *et al.*, 2007; Cattán *et al.*, 2009 y Acón-Ho *et al.*, 2013). En este agroecosistema, estos datos son importantes ya

que como muestra Raphael *et al.* (2012), este N puede contribuir a suplir las requerimientos del hijo, además en sus condiciones presentó buena sincronización con el momento de mayores requerimientos de este y dado que se incorpora paulatinamente, es menos propenso a perderse.

#### IV.3.1.3. Pérdidas de nitrógeno por volatilización

La volatilización de los fertilizantes inorgánicos y orgánicos, aplicados superficialmente, como se ha indicado anteriormente, constituye una salida alta del sistema que ocurre rápidamente cuando existen condiciones adecuadas y es responsable de la baja eficiencia del uso de la urea aplicada superficialmente (Sangoi *et al.* 2003; Barbieri y Echeverría, 2003; Isa *et al.*, 2006; Thieuleux, 2006; Baiyeri *et al.*, 2013).

Prasertsak *et al.* (2001), indican en su estudio de volatilización de la urea en banano realizado en Australia, que la humedad del suelo es un factor importante para disolver la urea y aún más la precipitación o el riego para lavarla dentro del perfil, para disminuir estas pérdidas, que alcanzaron el 34 % del N aplicado en su estudio. Similar resultado, pero con menor intensidad, se presentó en los primeros cuatro días entre las aplicaciones 1 y 3 contra la 2, con valores ligeramente diferentes, producto de las condiciones iniciales de humedad del suelo y precipitación, que demuestra, lo sensible que es este flujo de salida a las condiciones de humedad, que se tradujo en una pérdida total del 16% del N aplicado. Barbieri y Echeverría (2003) en pasto y Fontanetto *et al.* (2006) en trigo, ambos en Argentina y con el mismo método, obtuvieron pérdidas por volatilización del 20 y 8% respectivamente, concentrando las mayores pérdidas a los tres días después de la aplicación. Da Ros y Aita (2005), en Brasil, compararon la volatilización de la urea con el mismo método, en el cultivo de maíz con suelo cubierto y desnudo sin obtener diferencias, con pérdidas que alcanzaron el 17% de N aplicado.

Prasertsak *et al.* (2001), Barbieri y Echeverría (2003), Estada *et al.* (2005) y Fontanetto *et al.* (2006), indican que las pérdidas por volatilización se presentaron por un período de 14, 14, 15 y 11 días después de la aplicación de fertilizante en banano, pasto, caña de azúcar y trigo respectivamente, representando una salida rápida debido a las temperaturas y la humedad del suelo luego de la aplicación, sin embargo, dadas las condiciones climáticas de este estudio el curso se extendió hasta los 20 días en promedio.

Como vemos, las pérdidas por volatilización son importantes, pero anteriormente comentamos el potencial de nitrificación que parece ser alto y protegería el nitrógeno amoniacal de ser perdido por volatilización, sin embargo, este flujo representa la segunda pérdida en

magnitud después de la estimada por drenaje, lo que parece indicar que luego de la aplicación del fertilizante, el tiempo que demora el amonio en nitrificarse es mayor que el necesario para volatilizar el amoniaco. Acón-Ho *et al.* (2013), observó menor acumulación de formas disponibles de N procedentes de la urea, debido a una mayor tendencia de las pérdidas por volatilización, fomentados por suelos con altos contenidos de humedad (capacidad de campo a ligeramente saturados), similar al presentado en este trabajo, pH ligeramente ácido (6,5 a 6,8) y contenidos de materia orgánica de altos a medios. Otro aspecto a considerar y que fue evaluado por Sangoi *et al.* (2003) y Da Ros y Aita (2005), en laboratorio y en un cultivo de avena en campo, respectivamente, es la presencia de residuos de cosecha y la incorporación de la urea, las cuales disminuyen las pérdidas de N, por esta vía, que para el caso del plátano, donde el manejo de los residuos se efectúa esparcidos sobre la superficie, menos en un área de 0,5 m de distancia desde el pseudotallo, los beneficios de los residuos con respecto a la conservación de la humedad en esta área, no se presentan y la incorporación al momento de la siembra como vimos no sería aprovechada por la planta y roturar el suelo durante el ciclo del cultivo podría afectar las raíces, por lo tanto, serían alternativas a evaluar para disminuir la volatilización en este caso.

Como hemos visto, el lavado de nitrato y la volatilización de amoniaco, son los principales procesos que ocasionan la pérdida de N desde el suelo en el agroecosistema plátano, donde los mecanismos y magnitudes de pérdida dependen de la combinación de factores biológicos, químicos y físicos.

#### IV.3.1.4. Pérdidas de suelo y nitrógeno por erosión

La pérdida de sedimento en este trabajo ( $5,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) puede considerarse moderada, con respecto a los niveles medidos por Sánchez *et al.* (2002), entre  $0,43$  a  $15,2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , en parcelas con pendientes entre 5% y 89% en diferentes sistemas, ya que la pendiente de la parcela de este estudio es del 1%.

Así mismo, se obtuvo un patrón de asociación de la erosión con los eventos de precipitación. Torres *et al.* (2005), en suelo desnudo y cubierto, con lluvia simulada ( $120 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) obtuvo pérdidas de  $16$  y  $9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , respectivamente, superiores a nuestros resultados, que concuerdan con el planteamiento que los suelos con residuos colocados superficialmente, experimentan menores pérdidas de suelo por erosión.

La pérdida de nitrógeno en los sedimentos sigue el patrón observado para los sedimentos gruesos y finos que se relacionaron significativamente con el flujo de precipitación y escorrentía,

donde las diferencias en los valores de pérdida, están relacionadas con las cantidades de sedimentos, más no por la concentración de nitrógeno en el sedimento, la cual resultó prácticamente constante a lo largo del ciclo del cultivo, por lo que no se detectó una influencia de la aplicación superficial de la urea sobre esta variable, que puede indicar que el fertilizante debido a la dinámica del balance hídrico favoreció el lavado y la volatilización.

#### IV.3.1.5. Balance de nitrógeno

El balance de nitrógeno del agroecosistema fue positivo ya que aumento el N en el suelo levemente. Así mismo, asumiendo que el N perdido provino todo del fertilizante, podemos decir que solo el 7% de este nitrógeno aplicado quedó en el sistema y el resto se perdió por las diferentes vías.

En relación a los balances realizados por etapas de desarrollo, se puede indicar que durante la etapa de crecimiento vegetativo, se aplicó un exceso de fertilizante, ya que el cultivo solo absorbió menos de la mitad de la dosis y la volatilización, junto con el flujo de inmovilización, tomó parte de este nitrógeno. Durante la etapa reproductiva, donde la planta experimenta el mayor crecimiento de sus órganos, observamos que la fertilización no cubrió los requerimientos de la planta, que junto con las pérdidas simuladas por el drenaje, el flujo de mineralización, presentaron niveles en el mismo orden que la fertilización, que nos muestra la falta de sincronización de la fertilización con el crecimiento de la planta en la zona.

En la etapa reproductiva, la absorción es muy baja lo que se corresponde a lo han planteado Belalcázar (1991) y Turner *et al.*, (2007) de no aplicar fertilizante durante esta etapa.

El balance general del ciclo productivo, nos muestra que la dosis de fertilizante nitrogenado está en el mismo nivel, que el absorbido por la planta y gran parte de ese nitrógeno regresa al suelo en la necromasa, los principales problemas se presentan con las pérdidas, que llevan a un balance negativo del nitrógeno mineral del suelo que se traduce en pérdida de materia orgánica, afectando la sustentabilidad del sistema.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad de un agroecosistema se espera que el balance sea cercano a cero o positivo, es decir que el sistema tienda a enriquecerse en formas nitrogenadas, principalmente orgánica y al mismo tiempo que las salidas, en términos absolutos sean bajas, para prevenir la contaminación de fuentes de agua por nitratos provenientes de los fertilizantes aplicados o producto de la mineralización del nitrógeno orgánico. Así mismo, se busca garantizar la conservación de las propiedades físicas del suelo que están asociadas al movimiento

de agua y nutrientes, para reducir las pérdidas de suelo y nutrientes por erosión hídrica (Torres *et al.*, 2005; Ndabamenye *et al.*, 2013).

Bajo esta perspectiva, se da respuesta a la pregunta número 7, referida a la importancia de las pérdidas de N y las vías por las que ocurren, adicionalmente un aspecto importante de resaltar y que llama la atención, es la baja capacidad del agroecosistema estudiado para retener el nitrógeno que entra. Del total de entradas ( $40,54 \text{ g.m}^{-2}$ ) apenas un 8,95% queda en el agroecosistema al momento de la primera cosecha. Por otro lado sólo una cantidad muy pequeña de este N que entró sale del sistema a través de la cosecha (11,56%) y el resto, casi un 80% se pierde, a través del agua ya sea disuelto o en suspensión (60%) y un 20% por vía gaseosa. Esto no solamente nos define claramente un agroecosistema con una bajísima eficiencia del uso del fertilizante por el cultivo, sino con un potencial altísimo de pérdidas. Una de las posibles razones por las que tanto nitrógeno se pierde, puede ser que el manejo agronómico no promueve la acumulación de materia orgánica en el suelo. Otra razón puede ser que el fertilizante es agregado en forma mineral, absorbido por el cultivo en una proporción importante, pero luego pareciera perderse en el proceso de retorno de la necromasa. Esto hace que las dosis de fertilización deban mantenerse altas en el tiempo, ya que no se produce una acumulación progresiva de N que pudiera permitir un ciclado interno más importante, por lo que se puede decir que el agroecosistema se constituye en una especie de “colador” y fuente de contaminación importante.

#### IV.3.2. Aspectos considerados para la modelización

El trabajo de campo realizado en este tema, nos permitió obtener la información necesaria para el proceso de modelización con respecto a las concentraciones de N medidas en los diferentes flujos del balance hídrico, que se consideraron como datos de entrada en el submodelo de nitrógeno para estimar las salidas, así mismo se tomó un promedio de las pérdidas gaseosas de N desde el suelo sin fertilizante, para simular esta salida a lo largo del ciclo del cultivo. Igual ocurrió con el compartimento de nitrógeno mineral que fue obtenido de los muestreos de suelo realizados y se utilizó para estimar las pérdidas por drenaje. También se obtuvo la dinámica del nitrógeno en los flujos, que permitió calibrar el modelo y evaluarlo. Una de las mayores limitaciones que encontramos para modelizar el ciclo del nitrógeno fue el desconocimiento de las tasas de descomposición de la necromasa del plátano y de la dinámica de descomposición de la materia orgánica del suelo.

#### IV.3.3. Posibles consecuencias ambientales para el Lago de Maracaibo

Una de las motivaciones iniciales para realizar el balance de nitrógeno del agroecosistema plátano y que generó la pregunta de investigación 8, fue la posible importancia de este agroecosistema en la problemática de contaminación del lago de Maracaibo. En este sentido, podemos resaltar que si consideramos que en la zona se cultivan unas 30.000 ha de plátano, las cuales en promedio podrían recibir un aporte por fertilización de unos  $400 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ , la aplicación total de fertilizante nitrogenado en la región estaría en el orden de las 12.000 Mg de N. Ahora bien, si el valor de pérdidas a través del sistema de drenaje que obtuvimos se extrapola a escala de cuenca, esto equivale al 60% de las entradas, es decir que unas 7.200 Mg de N por año terminarían en el Lago de Maracaibo, que representa una cantidad de 288.000 sacos de urea.

Para poner esta cifra en contexto, podemos comparar con el balance de nitrógeno que realizó Conrads (2010), en la cuenca alta del río Chama. Esta autora realizó una estimación de cuanto N iría al río Chama, proveniente del sistema agrícola intensivo instalado en la cuenca alta de este río, hasta la población de Mucurubá, con unas 3.500 ha bajo el cultivo de papa, ajo, zanahoria y otras hortalizas. El balance obtenido indica que, de una entrada total de N a la cuenca de unos 2.100 Mg, apenas el 12% sale por el río Chama hacia el Lago de Maracaibo y el 67% permanece retenido en los suelos agrícolas, mostrando un comportamiento inverso al obtenido para el cultivo de plátano. Es decir, que de un aporte por hectárea de nitrógeno superior en el valle alto del Chama, una cantidad muy inferior termina perdiéndose, lo que indica que estos agroecosistemas tienen una mayor capacidad de retención de nitrógeno. A esta capacidad de retención, contribuye ciertamente la naturaleza más orgánica de sus suelos y el hecho de que el 80% del nitrógeno agregado es a través de fuentes orgánicas (gallinazo y cascarilla de arroz), lo que contribuye al mantenimiento y aumento de la materia orgánica, aunado al hecho de que las bajas temperaturas reducen las tasas de descomposición.

De la comparación anterior, resalta que el cultivo del plátano es potencialmente más contaminante, no sólo por su mayor extensión, sino por su bajísima capacidad de retener el N agregado.

#### IV.3.4. Manejo agronómico del agroecosistema plátano relacionado con el nitrógeno y la eficiencia de su uso.

De lo anteriormente discutido, resalta la necesidad de desarrollar sistemas de manejo del cultivo de plátano que permitan aumentar la eficiencia del uso del N, con el objetivo de reducir las

entradas de nitrógeno, aumentar la retención en el suelo, disminuir las pérdidas a través de los flujos hídricos y mejorar la sustentabilidad del agroecosistema.

Algunas prácticas que deberían ser consideradas al respecto podrían ser:

1. Cultivos asociados o policultivos. El objetivo principal con la asociación es que se pueda utilizar parte del N que deja “escapar” el plátano, con esto no solo trae la ventaja de que puede aumentar la eficiencia de uso de nutrientes sino que diversifica la producción. En estas asociaciones, se pueden considerar las leguminosas, sean perennes o anuales, que permitan reducir las entradas de N por fertilización. Otro objetivo, del diseño de esta propuesta es la de aumentar la capacidad del agroecosistema para retener nitrógeno y en este sentido habría que pensar en cultivos cuyos residuos sean de descomposición más lenta que la necromasa del plátano.
2. Utilización de fuentes orgánicas de nitrógeno que permitan ir aumentando el nivel de materia orgánica del suelo y por ende su capacidad de retener este nutriente. En este sentido, se debe evaluar la incorporación de abonos verdes y retomar las experiencias en la evaluación de abonos orgánicos (compost y lombricultura), realizados en la Estación Local Chama que incluyen fuentes disponibles, como el estiércol del ganado vacuno y cascara de cacao, biofertilizantes (Kuttimani *et al.*, 2013), con un enfoque ecológico y agronómico (Baiyeri *et al.*, 2013), y no solo desde el punto de vista del rendimiento.
3. Evaluar la contribución de N de los residuos de cosecha y su dinámica, para la nutrición del siguiente ciclo de producción, con el fin de regular las dosis de fertilizante, ya que según resultados de Raphael *et al.* (2012) representan el 40% del N absorbido por la planta.
4. La incorporación de fuentes orgánicas de N al sistema y la mezcla con los fertilizantes tradicionales. En este sentido, un enfoque interesante es el de analizar cómo lograr la sincronización entre la demanda del cultivo y la disponibilidad espacial y temporal a través de combinaciones de abonos y fertilizantes de diferente calidad, lo que permitiría reducir las pérdidas de N, al mantener un tamaño mínimo del compartimiento para satisfacer las necesidades de la planta (Dobermann y Cassman, 2004; Machado, 2005).

Es importante tener en mente que las tecnologías generadas, deben presentar una buena relación costo-beneficio y ser amigables, para que constituyan opciones atractivas para los productores y por lo tanto de fácil adopción (Dobermann y Cassman, 2004).

## Capítulo V. Modelo de simulación del agroecosistema plátano

### V.1. Introducción

La modelización, retomando lo planteado en el capítulo I, surge en la agricultura como una alternativa para la planificación del manejo y de la investigación agronómica, dado que puede utilizarse para predecir el comportamiento de un cultivo, realizar estimaciones de niveles de rendimiento potencial o reales bajo el efecto de diferentes condiciones ambientales, analizar limitaciones y manejos agronómicos (Candelaria *et al.*, 2011; Van Ittersum *et al.*, 2013). La construcción de un modelo de simulación resulta de particular utilidad para identificar vacíos en el conocimiento (Haefner, 2005) y orientar la investigación en función de los mismos. En este sentido, los modelos pueden ser usados para analizar los factores limitantes que provocan las diferencias entre los niveles de rendimiento teórico y los obtenidos por los productores y orientar la investigación para disminuir la brecha entre estos niveles de rendimiento, que para el caso de los cultivos se orienta a comprender mejor cómo se desarrollan y responden a las condiciones del medio (Van Ittersum *et al.*, 2013).

También la modelización puede ser útil como mecanismo de integración de la información disponible sobre el funcionamiento de un sistema, la cual, en el caso particular de los cultivos, se encuentra dispersa en multitud de trabajos especializados. El producto de ese proceso es un modelo de simulación conformado por algoritmos que describe matemáticamente la respuesta de un sistema agrícola a su entorno (Sau *et al.*, 2010), el cual pasa por procesos de calibración, validación y reformulación en etapas sucesivas a medida que va confrontándose con la realidad. El modelo, permite una exploración de los sistemas y de su comportamiento bajo diferentes escenarios, que en el caso de los modelos agrícolas, los convierte en una herramienta valiosa para analizar mejores prácticas, lo cual es prioritario debido a la demanda creciente de productos agrícolas para el desarrollo de la humanidad y los problemas ocasionados por el uso ineficiente de los recursos naturales y la modificación progresiva del medio donde crecen los cultivos, producto del cambio climático. En el escenario actual, los sistemas agrícolas requieren una adaptación adicional, para mantener su productividad en el nuevo entorno climático; por lo tanto, la importancia de este tipo de estudios, es el aporte de opciones para evaluar alternativas que permitan avanzar en el logro de una producción sustentable (De Wit, 1986; Sarmiento y Bowen, 2002; Sau *et al.*, 2010; Candelaria *et al.*, 2011; Van Ittersum *et al.*, 2013). En este sentido, los resultados expuestos en los capítulos III y IV, sobre la sincronización de la fertilización y la curva de

acumulación de N de la planta, pone de manifiesto la utilidad de la modelización para sincronizar la demanda del cultivo y la disponibilidad de N por mineralización y por fertilización.

En este capítulo, se describe el proceso de modelización del cultivo de plátano que se llevó a cabo en este trabajo, justificándose los enfoques y formulaciones, se muestra el conjunto de ecuaciones que representan los procesos considerados, las variables y parámetros que las componen y que permiten establecer las interacciones que ocurren en el agroecosistema y cómo responde a las condiciones específicas del experimento y como podría ser generalizado para otras condiciones de cultivo. Se discuten los puntos débiles o lagunas en el conocimiento del funcionamiento del cultivo y su respuesta a los factores del ambiente, lo cual puede orientar la investigación futura y permitir ir mejorando la simulación del cultivo.

El modelo presentado fue realizado en la plataforma de VENSIM versión 5.6b (Ventana Systems inc. 2006), con un paso de tiempo diario. Se planteó un modelo específico para el cultivo del plátano considerando las particularidades del crecimiento de la planta madre y el hijo, que incluyó los principales flujos de asimilados hacia los diferentes órganos desde el momento de la siembra hasta la cosecha de la planta madre. La información obtenida en campo sobre la dinámica de la fitomasa de la unidad de producción de plátano, permitió la calibración de una serie de parámetros necesarios para describir la producción diaria de asimilados y su asignación a los diferentes órganos de la planta.

En fases subsiguientes, por el número de flujos e interacciones, se separó la madre del hijo en ventanas independientes y se agregaron submodelos de balance hídrico y de nitrógeno (figura V-1). El submodelo de balance hídrico, simula la dinámica del agua en el suelo y los procesos de evaporación desde el suelo, la interceptación, infiltración, precipitación neta y esorrentía. El submodelo de balance de nitrógeno, incluye su dinámica en la planta madre, el hijo y el suelo, estos diferentes submodelos fueron calibrados con la información obtenida del experimento de campo. Este esfuerzo de modelización nos permitió agrupar en una sola plataforma prácticamente toda la información obtenida en los experimentos de campo, ya que la mayoría de los datos se utilizaron para calibrar diferentes coeficientes del modelo o como información de entrada al mismo, como la radiación, precipitación y otros datos climáticos y edáficos.

## V.2. Descripción del modelo de simulación del agroecosistema plátano

El modelo implementado para describir el crecimiento del cultivo de plátano está inspirado en el enfoque de los modelos de cultivo incluidos en la plataforma DSSAT, particularmente en el modelo CERES-Maíz (Jones y Kiniry, 1986), el cual fue adaptado a la forma de crecimiento del plátano, particularmente a su naturaleza perenne y clonal. Como todos los modelos de la familia DSSAT (Tsuji *et al.*, 1998), el modelo del crecimiento del plátano utiliza datos meteorológicos diarios, información básica del suelo, datos de manejo (fertilización, podas) y coeficientes específicos del cultivo para describir el crecimiento de la planta, en términos de acumulación de biomasa y cambios fenológicos asociados a su ciclo de vida. Cabe acotar que el modelo que presentamos aquí puede considerarse como una versión preliminar que requiere ser afinada y validada antes de su utilización con fines prácticos, pero que resuelve algunos de los principales retos de la simulación de este cultivo. En ese sentido nuestro esfuerzo se ha dirigido principalmente al submodelo de crecimiento del cultivo y se han utilizados submodelos sencillos de balance hídrico y de nitrógeno. En la figura V-1 se presenta en forma esquemática la estructura del modelo, con los diferentes submodelos, información de entrada requerida y los resultados arrojados por el mismo.

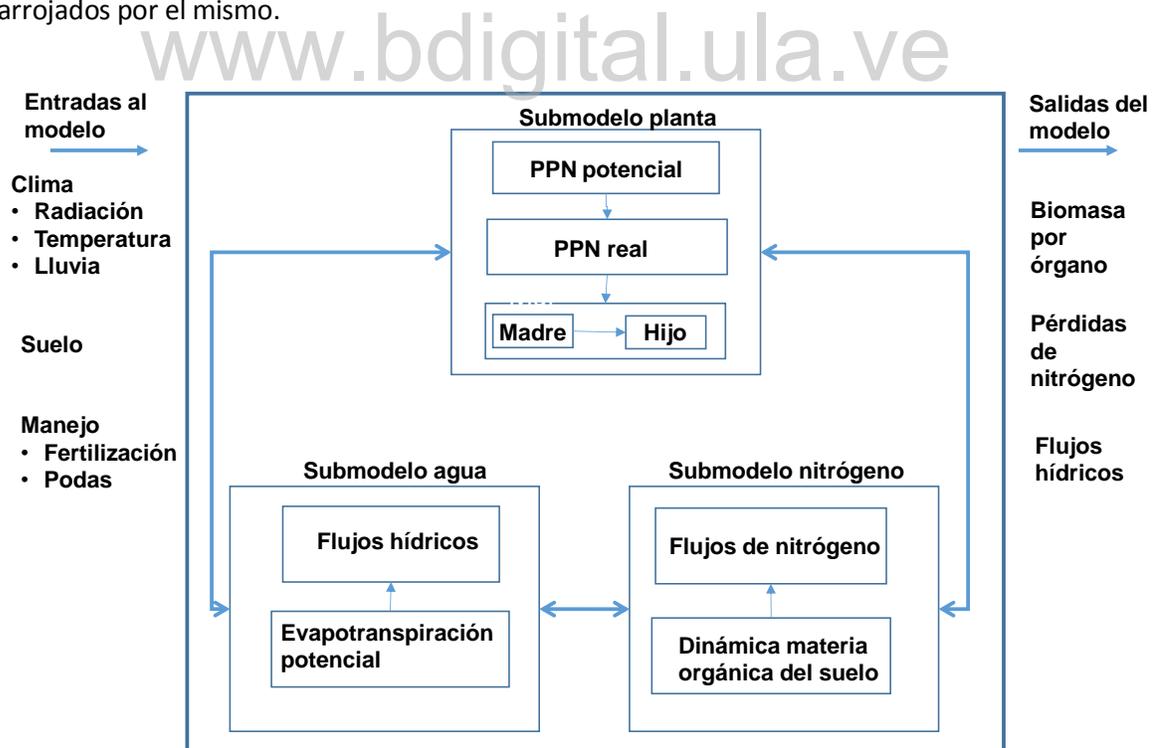


Figura V-1. Esquema del modelo de simulación del cultivo de plátano con sus diferentes submodelos y sus interacciones. Se indica la información de entrada requerida para correr el modelo y la información principal generada por el mismo.

### V.2.1. Simulación de la producción primaria neta potencial y real

A continuación se describe el procedimiento empleado para la modelización de la producción primaria neta. El enfoque se basa en calcular primero una producción primaria neta potencial (PPNpot) que representaría la producción de un cultivo que no está sometido a déficit hídrico ni de nutrientes (Penning de Vries *et al.*, 1989). Este valor potencial es posteriormente ajustado en función de las condiciones ambientales para obtener la producción primaria neta real o alcanzable (PPNReal), para lo cual se utilizan funciones de respuesta que consideran el efecto de las limitaciones hídricas ( $f(\text{agua})$ ) y de disponibilidad de nitrógeno ( $f(\text{N})$ ) como se muestra en la ecuación m-1.

$$\text{PPNreal} = \text{PPNpot} \times (\min(f(\text{N}), f(\text{agua}))) \quad \text{m-1}$$

donde  $f(\text{N})$  y  $f(\text{agua})$  son funciones de respuesta que varían entre 0, cuando la limitación es tan fuerte que la producción primaria se reduce a 0, y 1 cuando no hay limitación por el factor.

El submodelo de crecimiento de la planta madre de plátano, como se ha indicado, inicia con el cálculo de la producción primaria neta potencial (figura V-2), el cual se realiza en función de las variables: radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (IPAR) y eficiencia potencial de uso de la radiación (RUEPot) (Ec. m-2; Tabla V-1), utilizando la ecuación de Monteith (1977) quien mostró que existe una relación lineal entre la radiación interceptada y el aumento de la biomasa de un cultivo en condiciones óptimas, llevando al concepto de RUE, que sería la pendiente de dicha relación. Esta ecuación propuesta por Monteith es la base para el cálculo de la PPN en los modelos DSSAT (Ritchie *et al.*, 1998):

$$\text{PPNpot} = \text{IPAR} * \text{RUEpot} \quad \text{m-2}$$

Para calcular IPAR (ec. m-3), se utilizó la ley de Beer-Lambert (Monsi y Saeki, 1953):

$$\text{IPAR} = \text{PAR} \times (1 - e^{-k * \text{LAI}}) \quad \text{m-3}$$

donde  $k$  es el coeficiente de extinción de la luz, cuyo valor ( $k=0,46$ ), se tomó del presentado para banano por Turner (1994). La radiación fotosintéticamente activa (PAR) se calculó a partir de la radiación total (Rad), utilizando un cociente PAR/Rad constante de 0,48 (Tabla V-2) que es el valor promedio encontrado por Tsubo y Walker (2005) en una revisión de mediciones realizadas en diferentes condiciones. Los mismos autores encuentran que este cociente PAR/Rad puede variar entre 0,43 y 0,54, dependiendo de las condiciones locales, aumentando a medida que la atmosfera pasa de despejada a nublada. Es importante acotar que algunos autores advierten que en modelos

de crecimiento de cultivos, que como el nuestro se basan en la interceptación de la radiación, la utilización de un valor constante de PAR/Rad puede llevar a errores (Rao, 1984). La radiación total que se utilizó en el cálculo de PAR fue medida en la estación meteorológica instalada a 30 m del ensayo, adicionalmente se instaló un sensor para medición de PAR, obteniendo una relación de PAR/Rad de  $0,47 \pm 0,01$ , que está muy cerca de la relación generalizada utilizada en el modelo. Finalmente el índice de área foliar (LAI) se obtuvo del producto del área foliar específica (AFE) medida en campo y la biomasa de las hojas simulada (Ec. m-5, Tabla V-2, figura V-3). De esta forma el AFE no se tomó como un parámetro fijo sino que se consideró variable en el tiempo, según lo que arrojó la información experimental. Considerar un AFE fija constituye una fuente de error en muchos modelos, que no consideran que las características morfológicas de las hojas puedan sufrir cambios significativos dependiendo de la etapa de desarrollo del cultivo.

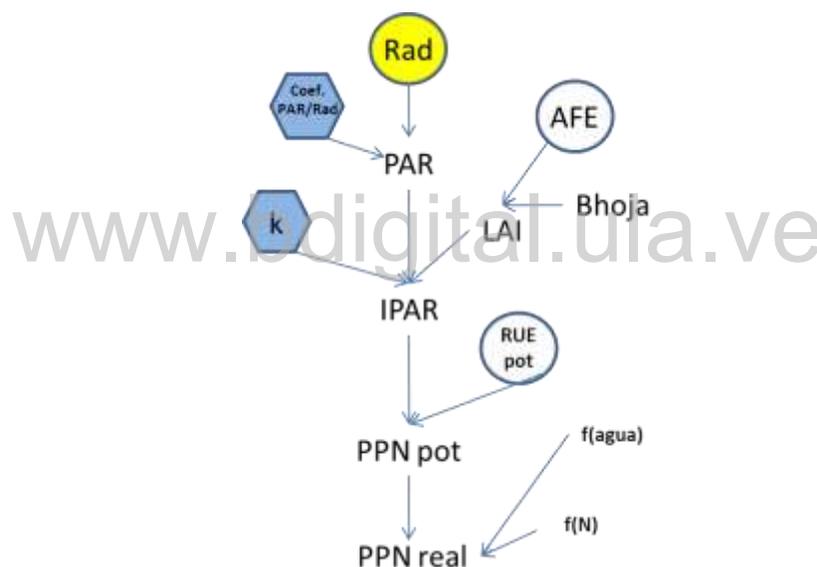


Figura V-2. Modelo de la producción primaria neta real (PPN real) a partir de la radiación incidente (RAD). El círculo amarillo representa la variable exógena radiación total, los círculos azules son datos de entrada medidos experimentalmente (AFE: área foliar específica del cultivo, RUE: Eficiencia en el uso de la radiación) y los hexágonos azules representan el factor de 0,48 para pasar de RAD a PAR y k, el parámetro coeficiente de extinción de la luz.

Por otro lado el valor de RUEpot que requiere la Ec. m-2 se calculó utilizando la Ec. m-6 que se deduce de las ecuaciones m-1 y m-2, utilizando un procedimiento de cálculo inverso (a partir de los valores reales obtenidos en el experimento se calcula el valor potencial, que luego se utiliza en el modelo bajo las mismas u otras condiciones ambientales):

$$RUE_{pot} = RUE_{real} / \min(f(N), f(agua)) \quad m-6$$

La RUEreal necesaria en la ecuación m-6 se calculó a partir de los datos experimentales del aumento de la biomasa de la planta en  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  entre dos períodos de muestreo, dividido entre la radiación interceptada (IPAR) acumulada en ese mismo período (figura III-12). Para obtener los valores diarios de índice de área foliar requerido para el cálculo de IPAR, se ajustaron los valores de LAI obtenidos en campo a ecuaciones polinómicas de sexto grado (figura V-4) y aplicando la ecuación para el cálculo de IPAR (ec. m-3, tabla V-2), se determinó el IPAR diario, para luego acumularlo en los intervalos entre muestreos, igual como se efectuó con la biomasa para determinar el RUEreal a usar en el cálculo del RUEpot.

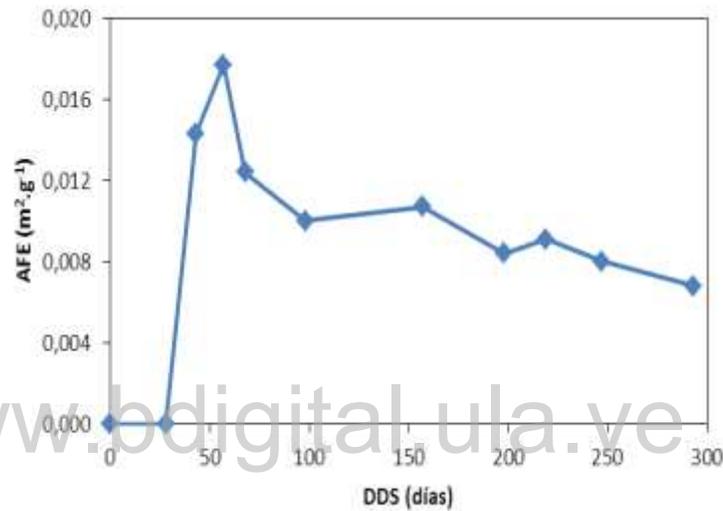


Figura V-3. Curso del área foliar específica a lo largo del desarrollo del cultivo medida experimentalmente y utilizada en el modelo para pasar los datos de biomasa foliar a área foliar.

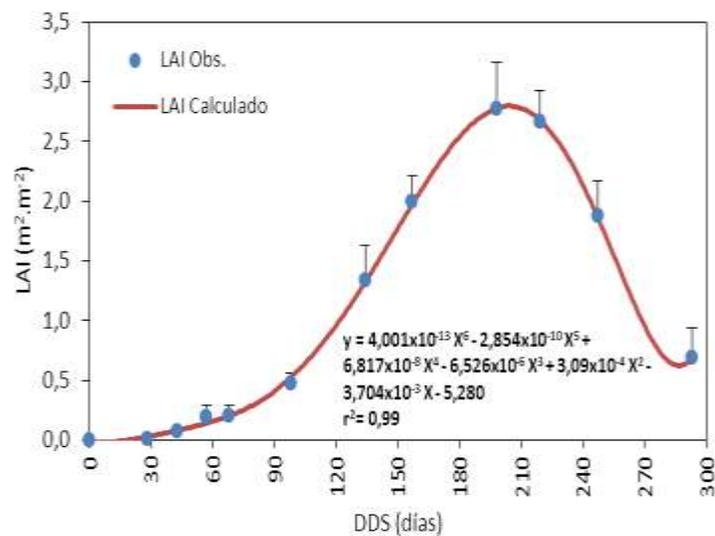


Figura V-4. Ajuste del índice de área foliar (LAI) medido en campo a una ecuación polinómica para el cálculo del LAI diario en la estimación del RUEreal.

La PPN<sub>real</sub> del modelo se obtuvo multiplicando la PPN<sub>Pot</sub> por el factor de reducción más limitante en cada paso de tiempo de la simulación. El factor de reducción de nitrógeno ( $f(N)$ ) se explica detalladamente en el submodelo de nitrógeno, mientras que el factor de reducción de agua ( $f(\text{agua})$ ) se explica en el submodelo de balance hídrico. La utilización de estos factores permite conectar el submodelo de crecimiento de la planta con los de nitrógeno y balance hídrico (figura V-1).

Una vez obtenida la PPN<sub>real</sub>, ésta es asignada a los diferentes órganos de la planta madre y de allí puede pasar al hijo. Esta asignación es dinámica en el tiempo, dependiendo de las etapas fenológicas, como se observó en campo. En el modelo se simula la asignación por medio de los coeficientes de partición como se muestra más adelante. Además se considera la existencia del hijo y nieto, que representa la sucesión de los ciclos productivos de la planta en el campo. En el modelo planteado, los sucesivos ciclos se efectúan por el reemplazo, al momento de la cosecha, de la madre con la información del hijo y el hijo con la del nieto, para lograr de esta forma perpetuar la plantación en el modelo. En este trabajo, solo se presentará el submodelo de la planta madre y el submodelo del hijo y el nieto como un compartimiento hasta la cosecha de la madre. En una fase de modelización posterior se incorporará el ciclo completo del hijo y el nieto ya que el ensayo de campo se continuó hasta la cosecha de éste (información no incluida en la tesis).

### **V.2.2. Submodelo de crecimiento de la planta madre de plátano**

Las variables y parámetros que se emplean en la construcción del submodelo planta madre se presentan en el tabla V-1, donde se puede observar su simbología, significado, unidades, referencia y sus ecuaciones en el tabla V-2.

La estructura del modelo de la planta madre consta de cinco compartimientos principales: biomasa del cormo ( $B_{\text{cormo}}$ ), biomasa de hojas ( $B_{\text{hoja}}$ ), biomasa deseudotallo ( $B_{\text{seudo}}$ ), biomasa de raíces ( $B_{\text{raíz}}$ ) y biomasa del racimo que incluye las flores y brácteas ( $B_{\text{rac}}$ ); así mismo, se establecieron otros compartimientos para los cormos de los hijos extra y la necromasa producida a nivel aéreo ( $mNE_{\text{aérea}}$ ) y subterráneo ( $mNE_{\text{subter}}$ ). La misma estructura se utiliza también para el hijo. Se consideraron los flujos de la PPN<sub>real</sub> hacia cada compartimiento así como los flujos de translocación inicial de asimilados desde el cormo (semilla sembrada) para la formación delseudotallo, hojas, raíces, flujos hacia el hijo y para el llenado del racimo (figura V-5).

Tabla V-1. Variables y parámetros utilizados en el modelo de crecimiento de la planta madre de plátano.

Radiación y productividad				
Símbolo	Significado	Unidad	Referencia	
PAR	Radicación fotosintéticamente activa	MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado	
IPAR	Radicación interceptada	MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Monsi y Saeki, 1969, citado por Lambers, 1998	
LAI	Índice de área foliar	m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup>	Calculado	
RUEpot	Eficiencia potencial de uso de la radiación	g.MJ <sup>-1</sup>	Calculado	
PPNpot	Producción primaria neta potencial	g.día <sup>-1</sup>	Calculado	
PPNreal	Producción primaria neta real	g.día <sup>-1</sup>	Calculado	
PPNrealACU	Producción primaria neta acumulada	g	Calculado	
PPNtotal	Suma de la PPNpot y PPNreal acum	g.día <sup>-1</sup>	Calculado	
Flujo de asimilados				
Fasim(ÓRGANO)	Flujo de asimilados para cada órgano	g.día <sup>-1</sup>	Calculado	
ASIGini(CH, CS, CRAIZ)	Asignación inicial de asimilados del cormo a la hoja, seudotallo y raíz	g.día <sup>-1</sup>	Calibrado	
ASIGmh	Asignación de asimilados del cormo madre al hijo	g.día <sup>-1</sup>	Calibrado	
ASIGmHE	Asignación de asimilados del cormo madre a los hijos extra	g.día <sup>-1</sup>	Calibrado	
FLUJO (cor-rac, pseudo-rac)	Flujo de asimilados del cormo madre al racimo y del seudotallo al racimo	g.día <sup>-1</sup>	Calibrado	
Compartimientos de Biomasa				
B(órgano)	Biomasa por órgano	g.m <sup>-2</sup>	Calculado	
Cose(órgano)	Biomasa cosechada	g.m <sup>-2</sup>	Calculado	
mNE(aérea o subter)	Necromasa aérea o subterránea	g.día <sup>-1</sup>	Calculado	

Tabla V-1. Continuación

Mortalidad			
FMOR(órgano)	Flujo de mortalidad por órgano a excepción del cormo	$g.m^{-2}.día^{-1}$	Calculado
TM(órgano)	Tasa de mortalidad por órgano a excepción de la raíz que fue calibrada	$g.m^{-2}.día^{-1}$	Calculado
FREcorte(HOJA, SEUDO)	Frecuencia de corte para el caso de hojas y seudotallo	días	Medido
FCose(órgano)	Flujo de cosecha	$g.día^{-1}$	Calculado
Coeficientes de distribución de asimilados			
KPART(órgano)	Coeficiente de partición por órgano a excepción de la raíz	Adimensional	Calibrado
PARini(órgano)	Parámetro de asignación inicial de asimilados por órgano a excepción de la raíz	Adimensional	Calibrado
PARc(órgano)	Parámetro de asignación durante el ciclo del cultivo a excepción de la raíz	Adimensional	Calibrado
TASIG(cor-raíz, cor-hoj, cor-h, cor-seudo, pseudo-rac, cor-rac, cor-Hextra)	Tasa de asignación de asimilados del cormo a la raíz, del cormo a la hoja, del cormo al hijo, del cormo al seudotallo, del seudotallo al racimo, del cormo al racimo y del cormo a hijos extra	$g.m^{-2}.día^{-1}$	Calibrado
INST(cor-raíz, cor-hoj y pseudo-rac)	Período de asignación de asimilados del cormo a los órganos (raíz, hoja) y del seudotallo al racimo	$g.día^{-1}$	Calibrado
Ciclo del cultivo			
DINI	Duración inicial del ciclo, 90 días para la aparición del primer hijo	DDS	Calculado
DCICLO	Duración del ciclo total sin la duración inicial	DDS	Calculado
Órgano: identifica al cormo, seudotallo, hojas, raíz, racimo, madre hijo e hijos extra.			
Parámetros, constantes y datos de entrada			
Símbolo	Significado	Unidad	Referencia
Rad	Radiación total	$MJ.m^{-2}.día^{-1}$	Estación Meteorológica
K	Coeficiente de extinción de la luz		Turner, 1994
AFE	Área foliar específica	$m^2.g^{-1}$	Medida
RUEpot	Eficiencia potencial de uso de la radiación de la planta madre	$g.MJ^{-1}$	Calculado
viCORMO	Peso promedio del cormo sembrado	$g.m^{-2}$	Medido
FREcorteHOJA	Frecuencia del deshoje	Días	Medido

Tabla V-2. Ecuaciones para describir los procesos del crecimiento y partición de asimilados de la planta madre de plátano utilizadas en el modelo.

Símbolo	Ecuación	Número ecuación
PPNreal	$PPNpot * (\min(f(\text{agua}), f(N)))$	m-1
PPNpot	$IPAR * RUEpot$	m-2
IPAR	$PAR * (1 - \text{EXP}(-k * LAI))$	m-3
PAR	$RAD * 0,48$	m-4
LAI	$Bhoja * AFE$	m-5
RUEpot	$RUEreal / (\min(f(\text{agua}), f(N)))$	m-6
RUEreal	$(B_{(tn)} - B_{(tn-1)}) / (IPAR_{(tn)} - IPAR_{(tn-1)})$	m-7
PPNrealACU	$\Sigma PPNreal$	m-8
PPNtotal	$PPNrealACU + PPNpot$	m-9
Fasim(órgano)	$PPNreal * KPART(\text{órgano})$	m-10
FasimRAIZ	$\text{IF THEN ELSE}(PPNreal > \Sigma \text{Fasim}(\text{órgano}), PPNreal - \Sigma \text{Fasim}(\text{órgano}), 0)$	m-11
KPART(órgano)	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Time} < 90, PARini(\text{órgano}), PARc(\text{órgano}))$	m-12
ASIGiniCRAIZ	$Bcormo * INSTcor-raíz$	m-13
INSTcor-raíz	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Time} < 43, TASIGcor-raíz, 0)$	m-14
ASIGiniCS	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Time} < 43, TASIGcor-seudo, 0)$	m-15
ASIGiniCH	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Time} < 57, INSTcor-hoj, 0)$	m-16
INSTcor-hoj	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Time} < 20, 0, TASIGcor-hoj)$	m-17
ASIGmh	$TASIGcor-h * Bcormo$	m-18
ASIGmHE	$TASIGcor-Hextra * Bcormo$	m-19
FMORhoja	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Time} > 293, \text{IF THEN ELSE}(\text{Time} > 90, \text{IF THEN ELSE}(\text{MODULO}(\text{Time}, FREcorteHoja) = FREcorteHOJA - 1, (Bhoja * TMhoja), 0), 0), 0)$	m-20
FMORseudo	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Time} > 90, \text{IF THEN ELSE}(\text{MODULO}(\text{Time}, FREcorteSEUDO) = 0, (Bseudo * TMseudo), 0), 0)$	m-21
FMORraíz	$mBraíz * TMraíz$	m-22
FMORrac	$Brac * TMracimo$	m-23
Suma asig hijo	$\Sigma ASIGmh$	m-24
<b>Variables de estado</b>		
$dBcormo/dt$	$FasimCORMO - ASIGiniCH - ASIGiniCS - ASIGiniCRAIZ - ASIGmh - ASIGmHE - FcoseCOR - FLUJOCOR - rac$	m-25
$dBhoja/dt$	$ASIGiniCH + FasimHOJA - FMORhoja - FcoseHOJ$	m-26
$dBseudo/dt$	$ASIGiniCS + FasimSEUDO - FMORseudo - FcoseSeu - FLUJO seudo-rac$	m-27
$dBraíz/dt$	$FasimRAIZ + ASIGiniRAIZ - FMORraíz - FcoseRAIZ$	m-28
$dBrac/dt$	$FasimRACIMO + FLUJOCOR - rac + FLUJO seudo-rac - FMORrac - FcoseRAC$	m-29
$dHijosExtra/dt$	$ASIGmHE$	m-30
$dmNE aérea/dt$	$FMORhoja + FMORseudo + FMORrac - \text{imput C Necromasa}$	m-31
$dmNEsubter/dt$	$FMORraíz - \text{imput C necromasa (nechRaíz)}$	m-32

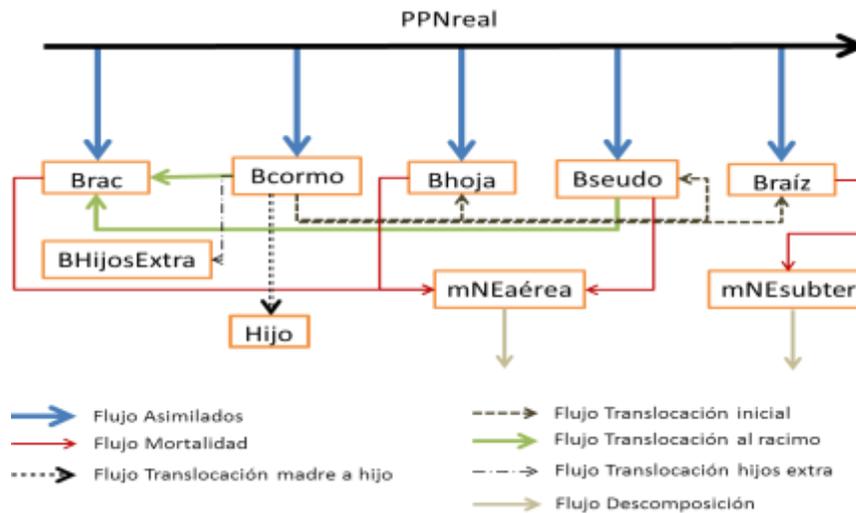


Figura V-5. Estructura del submodelo de planta madre del cultivo de plátano, donde se observan los flujos de translocación inicial, distribución de asimilados, translocación al racimo y mortalidad. Vista general VENSIM en anexo V-1.

Para determinar la proporción de la PPNreal que es asignada a cada órgano (Fasim(órgano)) se utilizaron coeficientes de partición (ec. m-10; m-12; tabla V-2):

$$\text{Fasim}(\text{órgano}) = \text{PPNreal} * \text{KPART}(\text{órgano}) \quad \text{Ec. m-10}$$

donde KPART(órgano) es la fracción de la PPNreal asignada a dicho órgano, cuyo valor varía diariamente en función del ciclo de la planta. Estos coeficientes de partición, cuya suma en un día particular debe ser 1, fueron calibrados manualmente utilizando la función Lookup de VENSIM, de tal manera que la biomasa simulada por órgano correspondiera lo mejor posible a la biomasa medida. Para garantizar que la suma de los coeficientes de partición a los diferentes órganos sea igual a 1, la cantidad de asimilados asignados a las raíces se calculó como 1 menos la asignación a los demás órganos, utilizando la Ec. m-11, que considera que la fracción de la PPNreal que no fue asignada a ningún órgano va a las raíces.

La dinámica temporal de las variables de estado, que en este caso son los diferentes compartimientos, se describe a través de ecuaciones diferenciales que efectúan un balance diario entre las entradas y salidas a través de los diferentes flujos, por ejemplo, para la biomasa de la hoja, la variación diaria se calcula por la ecuación m-26 (tabla V-2), que incluye las entradas por asignación del cormo, más el flujo de asimilados de la PPNreal hacia la hoja, menos el flujo de

mortalidad, menos la cosecha que es cuando se retira el racimo y se corta la planta madre, lo que implica que todas las hojas pasan al compartimiento de necromasa aérea.

### **V.2.3. Submodelo de crecimiento de la planta hijo del plátano**

El submodelo de la planta hijo (figura V-6), partió de la estructura del submodelo de la planta madre, al que se le eliminó el compartimiento del racimo (ya que los datos experimentales terminan antes de que inicie la formación del racimo de la planta hijo) y el compartimiento de los hijos pasó a llamarse nieto y nietos extra. En el tabla V-3 se presentan las variables y parámetros y la tabla V-4, las ecuaciones para la modelización del hijo.

El cálculo de la PPN del hijo se efectuó de forma similar a la madre pero en el cálculo de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el hijo (hIPAR) se le restó al PAR, la cantidad interceptada por la madre, bajo el supuesto de que el follaje del hijo se encuentra bajo el follaje de la madre. Para determinar la eficiencia de uso de la radiación por el hijo (hRUE), con los datos de campo (aumento de biomasa del hijo y radiación interceptada por el hijo), se presentó un problema, debido a que en los primeros períodos se obtuvieron valores anómalos (muy altos), excepto el último, producto de que el crecimiento del hijo está subsidiado por la madre y no depende solamente de su propio proceso fotosintético, por lo tanto, se tomó este último valor ( $3,81 \text{ g.MJ}^{-1}$ ) para el cálculo de hRUE y la diferencia para alcanzar el crecimiento medido en campo, se le incorporó como asignación de la madre al hijo. En este submodelo no se incorporó el enfoque potencial debido a que el ciclo del hijo está incompleto y el cual será incorporado en la próxima versión.

Con respecto a la biomasa radicular, como se indicó en el capítulo III, la fitomasa de raíces se cuantificó en un sólo compartimiento, por lo que se presentó el inconveniente de simular las raíces de la planta madre y el hijo por separado, la solución planteada fue la separación de las mismas en proporción al peso del cormo de la madre y el hijo, por lo que se determinó que la planta hijo comenzó con una biomasa de raíces equivalente al 1,94% de la biomasa total de raíces a los 98 DDS y finalizó al momento de la cosecha de la madre, a los 293 DDS, con 50,29%. El resto de los compartimientos se calcularon de forma similar a los compartimientos de la planta madre.

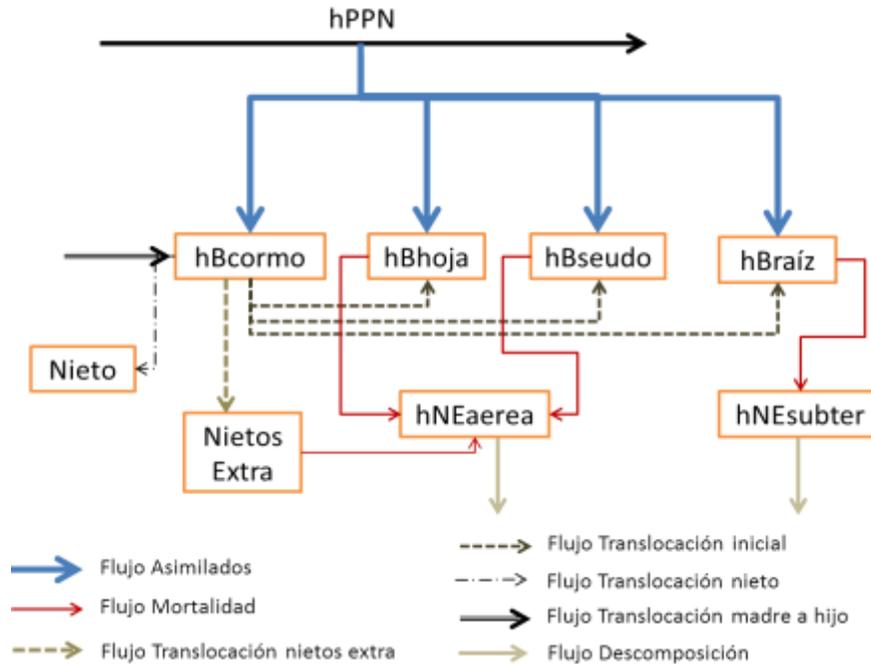


Figura V-6. Estructura del submodelo de planta hijo del cultivo de plátano, donde se observa la translocación inicial, distribución de asimilados y mortalidad. Vista general VENSIM en anexo V-2.

Tabla V-3. Variables y parámetros utilizados en el modelo de crecimiento de la planta hijo de plátano.

Radiación y productividad				
Símbolo	Significado	Unidad	Referencia	
hIPAR	Radicación interceptada por el hijo	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	calculado	
hLAI	Índice de área foliar del hijo	$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$	Calculado	
hRUE	Eficiencia en el uso de la radiación del hijo real	$\text{g.MJ}^{-1}$	Calculado	
hPPN	Producción primaria neta del hijo real	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado	
Flujo de asimilados				
hFasim(ÓRGANO)	Flujo de asimilados para cada órgano	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado	
hASIG(c-h, c-s, c-raíz, c-nextra, c-nieto)	Asignación inicial de asimilados del cormo a la hoja, seudotallo, raíz, nietos extra y nieto	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calibrado	
Compartimientos de Biomasa				
hB(órgano)	Biomasa del hijo por órgano	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado	
hNE(aérea o subter)	Necromasa aérea o subterránea del hijo	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado	
Mortalidad				
hFMOR(órgano)	Flujo de mortalidad por órgano a excepción del cormo	$\text{día}^{-1}$	Calculado	
hTM(órgano)	Tasa de mortalidad por órgano a excepción de la raíz que fue calibrada	$\text{día}^{-1}$	Calculado	

Tabla V-3. Continuación.

hKPART(órgano)	Coeficiente de partición del hijo por órgano a excepción de la raíz	Adimensional	Calibrado
hPARc(órgano)	Parámetro de asignación durante el ciclo del hijo a excepción de la raíz	Adimensional	Calibrado
hTASIG(cor-raíz, cor-hoja, cor-seudo, cor-Nextra, cor-nieto)	Tasa de asignación de asimilados del cormo hijo a la raíz, a la hoja, alseudotallo, a los nietos extra y al nieto	g.día <sup>-1</sup>	Calibrado
Parámetros, constantes y datos de entrada			
Símbolo	Significado	Unidad	Referencia
hK	Coeficiente de extinción de la luz		Turner, 1994
hAFE	Área foliar específica	m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>	Medida

Tabla V-4. Ecuaciones para describir los procesos del crecimiento y partición de asimilados de la planta HIJO de plátano utilizadas en el modelo.

Símbolo	Ecuación	Número ecuación
hLAI	hBhoja * hAFE	h-1
hIPAR	(PAR-IPAR)*(1-EXP(-hk*hLAI))	h-2
hPPN	hIPAR*hRUE	h-3
hFasim(órgano)	hPPN*hKPART(órgano)	h-4
hFasimRAIZ	IF THEN ELSE(hPPN>ΣhFasim(órgano), hPPN-ΣFasim(órgano),0)	h-5
hKPART(órgano)	IF THEN ELSE(Time<90, 0,h PARc(órgano))	h-6
hASIGc-(órgano)	hBcormo*hTASIGcor-(órgano)	h-7
hFMORhoja	IF THEN ELSE(Time<300, IF THEN ELSE(Time>214, IF THEN ELSE (MODULO (Time,FREcorteHoja)=FREcorteHOJA-1, (hBhoja*hTMhoja),0),0),0)	h-14
hFMORseudo	IF THEN ELSE(Time>214, IF THEN ELSE(MODULO(Time, FREcorteSEUDO) = FREcorteSEUDO-1, (hBseudo*hTMseudo), 0),0)	h-15
hFMORraíz	hBraíz * TMraíz	h-16
Variables de estado		
dhBcormo/dt	FasimCORMO + ASIGmh – Σ hASIGc-(órgano)	h-8
dhBhoja/dt	hFasimHOJA + hASIGc-h – hFMORhoja	h-9
dhBseudo/dt	hASIGc-s+ hFasimSEUDO – hFMORseudo	h-10
dhBraíz/dt	hFasimRAIZ + hASIGc-raíz – hFMORraíz	h-11
dhBnieto/dt	hASIGc-nieto	h-12
dhBNietosExtra/dt	hASIGc-nextra	h-13
dhNE aérea/dt	hFMORHoja + hFMORseudo –imput C Necromasa(nech)	h-17
dhNEsubter/dt	hFMORraíz – imput CNechomasa (nechRaíz)	h-18

#### V.2.4. Submodelo de balance de nitrógeno

El submodelo de nitrógeno se estructuró con tres compartimientos que incluyen el nitrógeno mineral, el N en la planta madre y en el hijo (figura V-7). En este caso se construyó una versión bastante simple, que no considera el N de los diferentes órganos y para el suelo no se consideraron las dos capas incluidas en las mediciones de campo. Esto pudiera ser incluido en versiones posteriores, sin embargo, para calcular la absorción de N en base a la disponibilidad en el suelo y la demanda del cultivo, que era lo interesante para calcular la función de respuesta al N, consideramos esta simplificación válida.

Puede observarse en la figura V-7, que el compartimiento nitrógeno mineral es una de las variables de estado más dinámicas y complejas del modelo, recibiendo entradas por deposición húmeda y pluvio lavado foliar, por la fertilización nitrogenada y por mineralización de la materia orgánica del suelo, que lo conecta con el submodelo de descomposición y los flujos de salida considerados son, la absorción de la planta madre y la planta hijo, la volatilización, la escorrentía y el drenaje (Tablas V-5 y V-6).

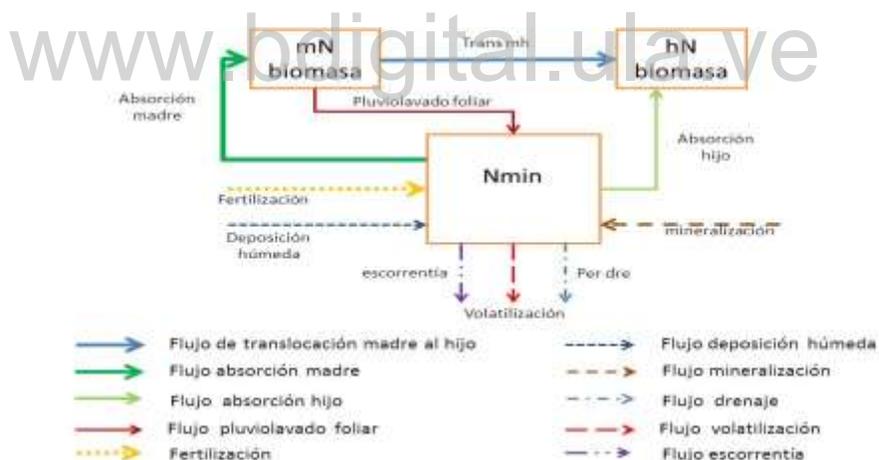


Figura V-7. Estructura del submodelo de balance de nitrógeno del agrosistema plátano, donde se observan los flujos de absorción de la madre y del hijo, las salidas y entradas de los compartimientos. Abreviaturas y formulas en los Tablas V-5 y V-6. Vista en VENSIM anexo V-3.

Los flujos de deposición húmeda, pluvio lavado foliar y escorrentía se simularon multiplicando la concentración mensual de nitrógeno medida en el agua por la cantidad de agua simulada en cada flujo, como se muestra en las ecuaciones N-8, N-9 y N-12. Para este enfoque fue necesario introducir las concentraciones de N medidas en campo como datos de entrada. Queda pendiente una simulación más mecanística de estas concentraciones, que evite tener que disponer

de toda esta información para correr el modelo. El flujo de volatilización se estimó utilizando el porcentaje de pérdida obtenido en el suelo fertilizado y sin fertilizante y la dosis de fertilización (ec. N-10), asumiendo que la pérdida se efectúa en un día. El flujo de pérdida de N por drenaje, se estimó multiplicando el flujo de drenaje simulado por la concentración de nitratos medida en la segunda capa del suelo, como se muestra en la ec. N-20.

El flujo de absorción de la madre (ec. N-4) se simuló en función de las variables de absorción máxima (que cuantifica la disponibilidad en el suelo de N para la planta) y de la demanda. La absorción máxima ( $\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}$ ) se estimó en función de la biomasa radicular ( $\text{g raíz}\cdot\text{m}^{-2}$ ) de la madre y su eficiencia de absorción ( $\text{gN}\cdot\text{g raíz}^{-1}$ ), suponiendo que a mayor biomasa de raíces hay más acceso al N mineral del suelo, según la ecuación:

$$\text{Abs max} = \text{Efi abs} \times \text{mBraíz} \quad \text{N-16}$$

donde la Efi abs es una función de la cantidad de N mineral en el suelo, según la ecuación:

$$\text{Efi abs} = 0.0010778 \times \text{Ln}(\text{Nmin})^{-0.0007354} \quad \text{N-17}$$

La N-17, es una ecuación empírica obtenida con el siguiente planteamiento: la eficiencia de absorción, se calculó en base a la absorción de N por la planta estimada en el experimento dividida por la biomasa de raíces y luego este valor se relacionó con el Nmin del suelo como se muestra en la figura V-8, donde se observa que para el cálculo de la ecuación N-17, se asumió una curva envolvente de los puntos considerados para el obtención de la ecuación. Este enfoque de las curvas envolventes se utiliza para calcular un valor potencial de absorción, los puntos que quedan debajo de la curva envolvente corresponderían a situaciones en las que el cultivo absorbió menos nitrógeno del que estaba disponible. Este enfoque supone que las raíces tienen una capacidad máxima de absorber N por unidad de masa, que a su vez depende de cuánto N mineral hay en el suelo.

Con respecto a la demanda de N por la planta madre, se obtuvo en base al aumento potencial de la biomasa (PPNpot) multiplicado por el % de nitrógeno crítico:

$$\text{Demanda} = \text{PPNpot} \times \%N_{\text{crítico}}/100 \quad \text{N-15}$$

donde él  $\%N_{\text{crítico}}$  se obtiene de la curva de dilución de nitrógeno utilizando la ecuación modificada de Greenwood (figura III-10) en función de la biomasa total del cultivo:

$$\%N_{\text{crítico}} = \begin{cases} \text{Si } W < 6,32 & 0,1235\text{Ln}w+1,8461 \\ \text{Si } W > 6,32 & 5,7W^{-0,5} \end{cases}$$

donde W es la biomasa total de la planta madre en Mg.ha<sup>-1</sup> que en este caso se calcula como la biomasa de la planta en el día anterior más la PPNpot.

Una vez calculada la disponibilidad de nitrógeno (Abs máxima) y la demanda del cultivo (Demanda) se calcula la absorción como el valor más bajo de los dos, es decir que el cultivo satisface su demanda si ésta es menor que el nitrógeno disponible, en caso contrario absorbe lo que está disponible y sufre déficit de este nutriente.

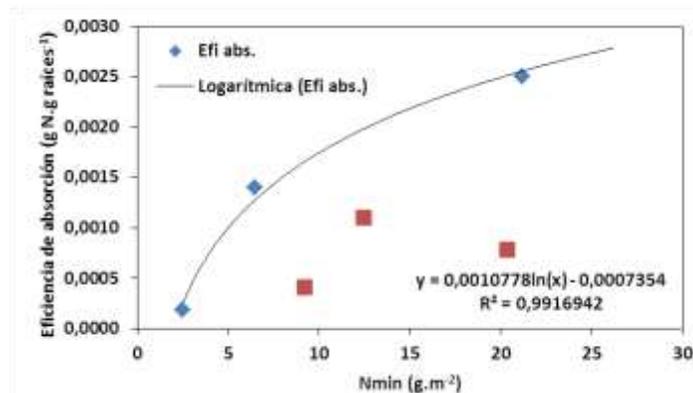


Figura V-8. Eficiencia de absorción de la planta madre calculada como la curva envolvente de la relación entre el Nmin del suelo y la cantidad de N absorbida por unidad de biomasa de raíces. Cuadros rojos puntos no considerados para el cálculo de la eficiencia de absorción.

Tabla V-5. Compartimientos, variables y parámetros utilizados en el submodelo de balance de nitrógeno.

Símbolo	Significado	Unidad	Referencia
<b>Compartimiento</b>			
dmN biomasa/dt	N en la biomasa de la planta madre	g.m <sup>-2</sup>	calculado
dhN biomasa/dt	N en la biomasa de la planta hijo	g.m <sup>-2</sup>	Calculado
dNmin/dt	Nitrógeno mineral	g.m <sup>-2</sup>	Calculado
<b>Flujo</b>			
m absorción	Absorción de N por la planta madre	g.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
h absorción	Absorción de N por la planta hijo	g.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
Trans mh	N translocado del cormo de la madre al hijo	g.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
fertilización	N aplicado vía fertilización	g.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Dosis
Deposición húmeda	N proveniente de la precipitación		Calibrado
Pluviolavado foliar	N proveniente del lavado de las hojas y seudotallo		Calibrado
mineralización	N proveniente de la descomposición de la materia orgánica del suelo	g.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
Volatilización	Pérdidas por volatilización del fertilizante + pérdida del suelo sin fertilizante	g.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calibrado
Per dre	Pérdidas por drenaje	g.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
Per esc	Pérdidas por escorrentía	g.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calibrado

Tabla V-5. Continuación

Variables	Significado		
%N <sub>crítico</sub>	Porcentaje de N crítico de la madre	%	Calculado
mNcormo	N de la biomasa del cormo madre	g.m <sup>-2</sup>	Calculado
hNbio	N requerido por la planta hijo	g.m <sup>-2</sup>	Calculado
Demanda	Demanda de N potencial de la planta madre	g.m <sup>-2</sup>	Calculado
Abs max	Absorción máxima posible de N de la planta madre (disponibilidad)		Calculado
Efi abs	Eficiencia de absorción de nitrógeno por la planta madre		Calculado
f(N)	Factor de reducción del crecimiento de la planta por disponibilidad de nitrógeno	adimensional	Calculado
Con NO3	Concentración de nitrógeno en la solución del suelo	mg.l <sup>-1</sup>	Calculado
Parámetros y datos de entrada			
viNmin	Valor inicial de N mineral en el suelo	g.m <sup>-2</sup>	Medido
viNcormo	Valor inicial de N en cormo madre	g.m <sup>-2</sup>	Medido
DosisFertN	Dosis de fertilizante nitrogenado	g.m <sup>-2</sup>	
DDSFertNx	Días después de la siembra para la aplicación del fertilizante nitrogenado. La x representa el número de aplicaciones en este caso tres	DDS	
%mNplanta	Concentración de N en la planta madre	%	Medido
%hNplanta	Concentración de N en la planta hijo	%	Medido
Nprec	Concentración de N en la precipitación	mg.l <sup>-1</sup>	Medido
%mNcormo	Concentración de N de la biomasa del cormo madre	%	Medido
Npn	Concentración de N en la precipitación neta	mg.l <sup>-1</sup>	Medido
Nesc	Concentración de N en la escorrentía	mg.l <sup>-1</sup>	Medido
NO3 C2	N en forma de nitrato en la capa 2 de suelo	mg.kg <sup>-1</sup>	Medido
%NperVol	Porcentaje de n perdido por volatilización	%	Medido
VolNnatural	N perdido naturalmente por el suelo	g.m <sup>-2</sup>	Medido
Peso C2	Densidad aparente del suelo de la capa 2	Kg.m <sup>-3</sup>	Medido

La absorción del hijo (ec. N-5), se estimó en base al nitrógeno existente en la biomasa de la planta (hN biomasa) y al nitrógeno requerido por la planta (hNbio), este último como se muestra en la ecuación N-14, se calculó con los porcentajes de nitrógeno obtenidos en campo para el hijo, multiplicado por la suma de la producción primaria neta del hijo y la asignación de la madre al hijo. La translocación de nitrógeno de la madre al hijo se calculó en base a la asignación madre-hijo y se asumió que el porcentaje de nitrógeno de este flujo es igual al valor obtenido para el cormo de la madre (ec. 6).

Tabla V-6. Ecuaciones para describir los procesos del submodelo de balance de nitrógeno.

Símbolo	Ecuación	Número ecuación
dmN biomasa/dt	m absorción – pluviolavado foliar – trans mh	N-1
dhN biomasa/dt	H absorción + trans mh	N-2
dNmin/dt	Deposición húmeda + fertilización + mineralización + pluviolavado foliar – m absorción – h absorción – per dre – per esc – volatilización	N-3
m absorción	MIN (Abs max, Demanda2)	N-4
h absorción	IF THEN ELSE (hN biomasa < hNbio, IF THEN ELSE (Nmin >= hNbio – hN biomasa, hNbio – hN biomasa, Nmin), 0)	N-5
trans mh	ASIGmh * %mNcormo/100	N-6
Fertilización	IF THEN ELSE (Time=DDSFertN01: OR: Time=DDSFertN02: OR: Time=DDSFertN03, DosisFertN,0)	N-7
Deposición húmeda	(Precipitación * Nprec)/1000	N-8
Pluviolavado foliar	Pn*Npn/1000	N-9
Volatilización	VolNnatural+(%NperVol/100)*Fertilización	N-10
Per dre	Drenaje*Con NO3/1000	N-11
Per esc	Nesc*Escorrentía/1000	N-12
%N <sub>crítico</sub>	IF THEN ELSE ((PPNtotal+viCORMO)/100 < 6,32, 0,1235*Ln((PPNacu+viCORMO)/100)+1,8461, 5,7*((PPNacu+viCORMO)/100^-0,5)	N-13
hNbio	(hPPNacum+Suma asig hijo)*(%hNplanta/100)	N-14
Demanda	PPNpot * %crítico/100	N-15
Abs max	Efi abs * mBraíz	N-16
Efi abs	0.0010778 x Ln (Nmin) <sup>-0.0007354</sup>	N-17
f(N)	min (INN, 1)	N-18
f(N2)	min (Abs max/demanda, 1)	N-19
Con NO3	NO3C2 * Peso C2 / Agua C2	N-20
INN	%mNplanta / %N <sub>crítico</sub>	N-21

La RUEpot se calculó como indicamos anteriormente y para reducir luego la PPNpot a PPNreal se requiere una función de respuesta del crecimiento del cultivo a la disponibilidad de nitrógeno. La única “pista” de que disponíamos del nivel de déficit de nitrógeno a que pudo estar sometido el cultivo era el INN (Índice de Nutrición de Nitrógeno), calculado en función del nitrógeno crítico. El valor del INN fue igualado a una primera función de respuesta al nitrógeno:

$$INN = \%N \text{ de la planta} / \%N_{\text{crítico}} \quad N-21$$

$$f(N) = \min (INN, 1) \quad N-18$$

esta última ecuación iguala a 1 los valores de INN mayores a 1, debido a que el INN contempla valores mayores a 1 cuando el %N de la planta es mayor al %N<sub>crítico</sub>, lo cual se considera como un consumo suntuoso de N por la planta, el cual no fue considerado en el modelo. Esta ecuación de respuesta fue utilizada para calcular la RUE<sub>pot</sub> del cultivo, junto con la función de respuesta al agua (m-6).

Se calculó una segunda función de respuesta al N (f(N<sub>2</sub>)) que no requiere datos de campo de %N de la planta, sino que considera la absorción potencial del cultivo y el nitrógeno disponible en el suelo:

$$f(N_2) = \min (\text{Abs max}/\text{demanda}, 1) \quad \text{N-19}$$

donde hay que recordar que la variable Abs max, estima la cantidad del N<sub>min</sub> presente en el suelo que es accesible a la planta. Definida así, esta segunda función de respuesta adquiere un valor de 1 cuando la disponibilidad de N en el suelo es igual o superior a la demanda por la planta y valores cada vez más bajos a medida que la disponibilidad se hace menor a la demanda hasta llegar a 0 cuando la disponibilidad de nitrógeno en el suelo es 0, lo cual puede ocurrir porque no haya N mineral o porque no haya raíces. En la figura V-9, se ejemplifica gráficamente como funciona este factor con varias relaciones hipotéticas entre disponibilidad (Abs máxima) y demanda. Este segundo factor de respuesta se utilizó alternativamente al primero, salvo para el cálculo del RUE<sub>pot</sub>.

#### **V.2.5. Submodelo de descomposición**

El submodelo de descomposición fue incorporado al modelo de simulación del agroecosistema plátano con el objetivo de calcular la mineralización del nitrógeno orgánico, ya sea el que se encuentra formando parte de la materia orgánica del suelo, como del que se incorpora a través de la necromasa del cultivo. Este flujo resulta importante ya que es una de las entradas al compartimiento de N mineral, del cual las plantas toman el N que necesitan. El modelo desarrollado se fundamentó en una versión existente del modelo SINCRO, que fue desarrollado en el Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE) en la misma plataforma de VENSIM por Sarmiento (descrito en Felicien, 2009). Este modelo simula la dinámica del carbono y nitrógeno considerando la incorporación al suelo de abonos orgánicos y la fertilización mineral, el cual fue planteado para la sincronización entre el aporte de gallinaza y pargana que efectúan los productores de papa en los Andes venezolanos. A este nivel es importante simular conjuntamente

el carbono y el nitrógeno ya que la mineralización del N, que es el proceso que nos interesa, depende de la interacción entre ambos elementos.

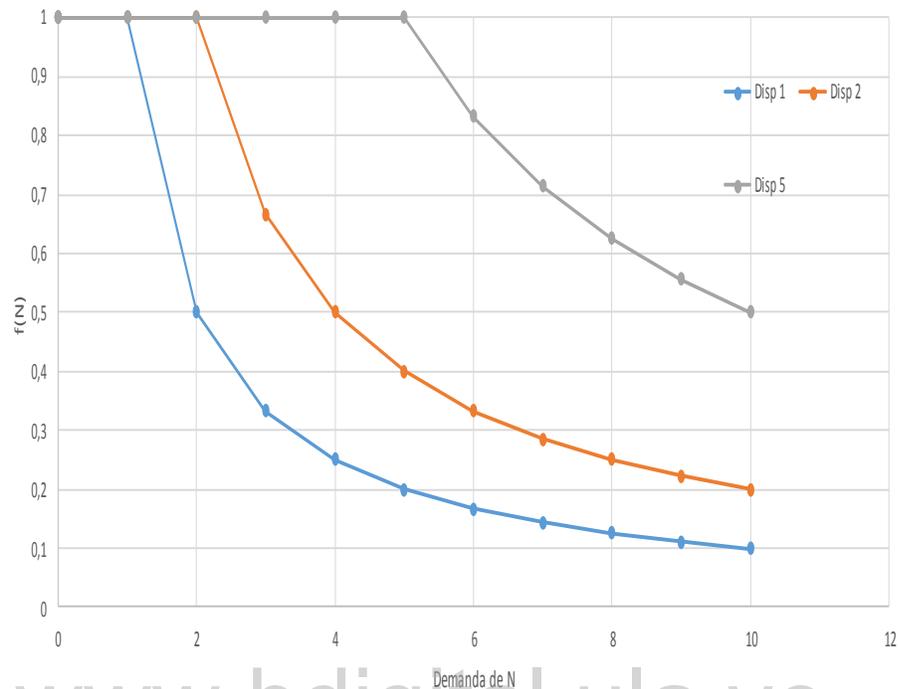


Figura V-9. Funcionamiento del factor de reducción ( $f(N_2)$ ), en diferentes situaciones hipotéticas de la disponibilidad (Disp) de N.

Para elaborar el submodelo de descomposición, se establecieron seis compartimientos, tres para carbono y tres para nitrógeno (figura V-10) que son: el C y N de la necromasa, el C y N de la biomasa microbiana y el C y N del humus. Se consideran nueve entradas de necromasa al sistema de descomposición: mortalidad de las hojas de la madre y del hijo, del seudotallo de la madre y del hijo, de las raíces de la madre y del hijo, de racimo, de los hijos extra y de los nietos extra. La mortalidad de los compartimientos aéreos se produce por las prácticas de deshoje, limpieza del seudotallo y deshije. Todas estas entradas son calculadas en los submodelos de planta madre y planta hijo. Cada una de estas entradas da lugar a un compartimiento de necromasa pero para simplificar la estructura gráfica del modelo los diferentes tipos de necromasa se introdujeron como suscritos (herramienta de VENSIM) y aparecen en las vistas del modelo como si fueran uno solo. Debido a la escasa información para su calibración, se plantearon sólo tres coeficientes de velocidad de descomposición, uno para las hojas ( $K_{ho}$ ) que se utilizó para la necromasa de hojas de la madre y el hijo, uno para el seudotallo ( $K_{se}$ ) que se utilizó para la necromasa de seudotallo de la madre y el hijo, los hijos y nietos extra y el racimo y finalmente el de las raíces ( $K_{ra}$ ) para la

necromasa de las raíces de la madre y el hijo. Estos coeficientes determinan el flujo entre los diferentes tipos de necromasa y la biomasa microbiana, a través de ecuaciones de primer orden, del tipo:

$$\text{des Necromasa} = K_{ne} \times \text{necromasa} \quad \text{Ec. D-1 y D-4}$$

donde  $K_{ne}$  es la constante de descomposición característica de cada tipo de necromasa (Tabla V-7 y V-8).

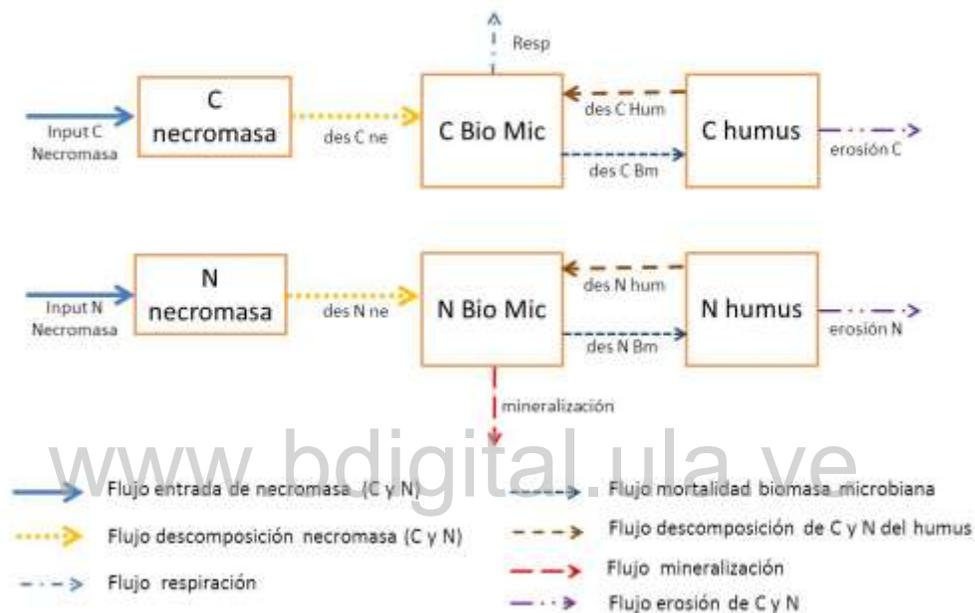


Figura V-10. Estructura del submodelo de descomposición del agrosistema plátano, donde se observan los flujos de salida y entrada de los compartimientos. En los Tablas V-7 y V-8 se muestran las abreviaturas y ecuaciones. Vista general VENSIM en anexo V-4.

El compartimiento de carbono de la biomasa microbiana, presenta las entradas de descomposición de la necromasa y del humus y las salidas de humificación y respiración, que son similares para el módulo de nitrógeno con la diferencia de que la respiración se cambia por la mineralización que funciona en ambos sentidos (mineralización del N de los microorganismos e inmovilización del N mineral). La dirección neta de este flujo depende de la relación C/N de la biomasa microbiana, la cual debe mantenerse en un valor fijo que corresponde al parámetro C/N Bm. Para estimar este flujo se calcula el balance de las entradas y salidas de C y N de la biomasa microbiana sin considerar el flujo por mineralización y con este balance se calculan las variables C Bm actual y N Bm actual y su cociente que es C/N Bm actual. Si este cociente disminuye con

respecto al valor nominal (C/N Bm), entonces se calcula que cantidad N debe ser mineralizada para volver al valor nominal y en caso de que la C/N Bm actual sea más alta que el valor nominal se calcula cuanto N mineral debe ser inmovilizado. Este cálculo lo realiza la ecuación D-18. El valor nominal de C/N actual fue considerado fijo y se le atribuyó un valor de 10 (Sarmiento, 1995).

Finalmente el compartimiento del humus, que es similar para el carbono y nitrógeno, presenta como entrada la humificación por la biomasa microbiana y como salidas la descomposición y la erosión.

En este submodelo de descomposición, la velocidad de los diferentes flujos está controlada por dos factores de reducción, que toman en cuenta el agua en el suelo (f(agua)) y la temperatura (f(temp)), los cuales actúan multiplicativamente, siguiendo los lineamientos del modelo SINCRO.

El factor de reducción por temperatura, fluctúa entre 0 y 1 y se planteó en base a una temperatura óptima que se fijó en 30 °C, la temperatura media diaria medida en la estación climática y Q10 que se fijó en 2, donde a valores de temperatura por encima del valor óptimo la función se iguala a 1, como se muestra en la ecuación D-19 y su expresión gráfica en la figura V-11.

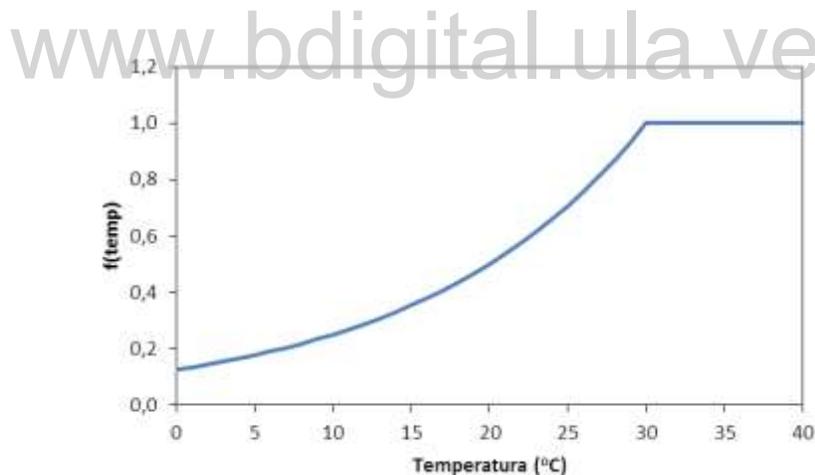


Figura V-11. Factor de reducción por temperatura utilizado en el submodelo de descomposición.

Finalmente, el cálculo del flujo de erosión, que se determinó por medio de la relación lineal empírica obtenida entre el volumen de escorrentía y la cantidad de sedimento utilizando los datos de campo (figura III-27), que describió la ecuación:

$$\text{Sed} = \text{escorrentía} * \text{Ksed1} - \text{Ksed2}, (r^2 = 0,84) \quad \text{D-23}$$

Tabla V-7. Compartimientos, variables y parámetros utilizados en el submodelo de descomposición.

Compartimiento			
Símbolo	Significado	Unidad	Referencia
C necromasa	C de la necromasa	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado
C Bio Mic	C de la biomasa microbiana	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado
Chumus	C del humus	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado
N necromasa	N de la necromasa	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado
N Bio Mic	N de la biomasa microbiana	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado
Nhumus	N del humus	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado
Flujo			
input C Necromasa	Entrada de C por la necromasa proveniente de los flujos de mortalidad de los diferentes órganos de la madre y el hijo, agrupados como suscritos.	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
des C ne	Descomposición del C de las diferentes necromasa de la planta madre y el hijo	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
des C Hum	Descomposición del C del humus	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
des C Bm	Humificación de C por parte de la biomasa microbiana	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
erosión C	Erosión de C	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
Resp	Respiración de la biomasa microbiana	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
input N necromasa	Entrada de N por la necromasa proveniente de los flujos de mortalidad de los diferentes órganos de la madre y el hijo; agrupados como suscritos.	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
des N ne	Descomposición del N de las diferentes necromasa de la planta madre y el hijo	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
des N hum	Descomposición del N del humus	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
des N Bm	Humificación del N por parte de la biomasa microbiana	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calibrado
erosión N	Erosión de nitrógeno	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
mineralización	Mineralización neta de N	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado
Sed	Erosión	$\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$	Calculado

Tabla V-7. Continuación

Variables				
f(temp)	Factor de reducción por la temperatura	Adimensional	Calculado	
CBm actual	Carbono de la biomasa microbiana por día	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado	
NBm actual	Nitrógeno de la biomasa microbiana por día	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado	
CsN actual	Relación C/N de la biomasa actual de la biomasa microbiana	Adimensional	Calculado	
Parámetros y datos de entrada				
%C	Porcentaje de C	%	Gayoso y Guerra (2005)	
Kho	Coefficiente de descomposición de la necromasa de las hojas		Calibrado	
Kse	Coefficiente de descomposición de la necromasa delseudotallo y racimo		Calibrado	
Kra	Coefficiente de descomposición de la necromasa de raíces		Calibrado	
qCO2	Coefficiente respiratorio		Valery, Alvin (1952)	Sin publicar
Q10	Factor Q10		Calibrado	
Kbm	Coefficiente de humificación de la biomasa microbiana		Calibrado	
Kh	Coefficiente de descomposición del humus		Calibrado	
Ksed1	Coefficiente para el cálculo del sedimento en el flujo de escorrentía (Ecu. D-17)		Calculado	
Ksed2	Coefficiente para el cálculo del sedimento en el flujo de escorrentía (Ecu. D-17)		Calculado	
C/N Bm	Relación C/N de la biomasa microbiana		Sarmiento, (1995)	
%Nnec	Concentración de Nn cada uno de los tipos de necromasa	%	Medido	
%Nsed	Concentración de N en el sedimento	%	Medido	
Chini	C inicial total en el suelo	$\text{g.m}^{-2}$	Calculado	
Nhini	N inicial total en el suelo	$\text{g.m}^{-2}$	Medido	
CsN MOS	Relación carbono nitrógeno de la materia orgánica del suelo			
TEMPopt	Temperatura optima	°C		

Tabla V-8. Ecuaciones para describir los procesos del submodelo de descomposición.

Símbolo	Ecuación	Número ecuación
dC necromasa/dt	input C Necromasa (Necromasa) – des C ne (Necromasa)	D-1
dC Bio Mic/dt	SUM(des C ne (Necromasa!)) – Resp – des C Bm + des C Hum	D-2
dChumus/dt	des C Bm – des C Hum – erosión C	D-3
dN necromasa/dt	input N necromasa (Necromasa) – des N ne (Necromasa)	D-4
dN Bio Mic/dt	des N hum + SUM(des N ne (Necromasa!)) – des N Bm - mineralización	D-5
dNhumus/dt	des N Bm – des N hum – erosión N	D-6
input C Necromasa	FMOR (órgano) * %C + hFMOR (órgano) * %C + ASICmHE * %C + hASIGc-nextra * %C	D-7
des C ne	(C necromasa (hoja) * Kho + C necromasa (seudo) * Kse + C necromasa (racimo) * Kse + C necromasa (raíz) * Kra + C necromasa (Hextra) * Kse + C necromasa (Nextra) * Kse + C necromasa (hHoja) * Kho + C necromasa (hSeudo) * Kse + Cnecromasa (hRaíz) * Kra) * F(agua) * F(TEMP)	D-8
des C Bm	C Bio Mic * Kbm * FACredC1 * FACredTEMP	D-9
des C Hum	Chumus * KH * FACredC1 * FACredTEMP	D-10
Resp	C Bio Mic * qCO2	D-11
erosión C	erosión N * CsNMOS	D-12
input N Necromasa	FMOR (órgano) * %Nnec (órgano)/100 + hFMOR (órgano) * %Nnec (órgano)/100 + ASICmHE * %Nnec (Hextra)/100 + hASIGc-nextra * %Nnec (Nextra)	D-13
des N ne	(N necromasa (hoja) * Kho + N necromasa (seudo) * Kse + N necromasa (racimo) * Kse + N necromasa (raíz) * Kra + N necromasa (Hextra) * Kse + N necromasa (Nextra) * Kse + N necromasa (hHoja) * Kho + N necromasa (hSeudo) * Kse + N necromasa (hRaíz) * Kra) * FACredC1 * FACredTEMP	D-14
des N Bm	N Bio Mic * Kbm * FACredC1 * FACredTEMP	D-15
des N Hum	Nhumus * KH * FACredC1 * FACredTEMP	D-16
erosión N	(Escorrentía * Ksed1 – Ksed2) * %Nsed/100	D-17
mineralización	IF THEN ELSE (CsN actual < C/N Bm, N Bio Mic – (C Bio Mic/C/N Bm), IF THEN ELSE (Nmin > 0, MIN (-(C Bio Mic/C/N Bm) – N Bio Mic), Nmin), 0))	D-18
FACredTEMP	IF THEN ELSE (TMed < TEMPopt, Q10^((Tmed – TEMPopt)/10), 1)	D-19
CBm actual	C Bio Mic + SUM (des C ne (Necromasa!)) + des C Hum – Resp – des C Bm	D-20
NBm actual	N Bio Mic + SUM (des N ne (Necromasa!)) + des N Hum – des N Bm	D-21
CsN actual	CBm actual / NBm actual	D-22
Sed	escorrentía * Ksed1 – Ksed2	D-23

### V.2.6. Submodelo de balance hídrico

En el submodelo de balance hídrico, se plantearon dos módulos uno referido a la dinámica hídrica en el suelo y el otro referido al dosel de la planta (figura V-12), las abreviaturas y ecuaciones se muestran en las Tablas V-9 y V-10. El primer módulo se compone de dos compartimientos representado las dos capas de suelo consideradas en este estudio (ec. Bh-1 y Bh-2).

El agua en la capa 1 (figura V-12), se simuló con cuatro flujos uno de entrada representado por la infiltración (ec. Bh-4), calculada en base a la precipitación neta y la escorrentía y tres flujos de salida, conformados por la evaporación directa del suelo (ec. Bh-5), la transpiración (ec. Bh-6) y la percolación hacia la segunda capa de suelo (ec. Bh-8). Para el cálculo de la evaporación desde el suelo, se consideró la cobertura del suelo (proporción de suelo desnudo) que permite repartir proporcionalmente las pérdidas gaseosas del agua del suelo entre la evaporación y la transpiración. Se calculó la evaporación potencial del suelo utilizando la ecuación de Penman (1948) y un factor de reducción que se calcula según el agua disponible en el suelo utilizando la ecuación:

$$\text{Factor reducción de la evaporación} = (\text{Agua C1} - \text{ADWC1}) / (\text{CC} - \text{ADWC1}) \quad \text{Ec. Bh-15}$$

este factor puede variar entre 0 y 1, adquiriendo el valor de uno cuando el agua de la capa 1 del suelo es mayor o igual a la capacidad de campo (no hay limitaciones a la evaporación potencial) y el valor de 0 cuando el agua de esta capa es igual al contenido de agua del suelo secado al aire (ADWC1), es decir cuando no queda más agua disponible para el proceso de evaporación.

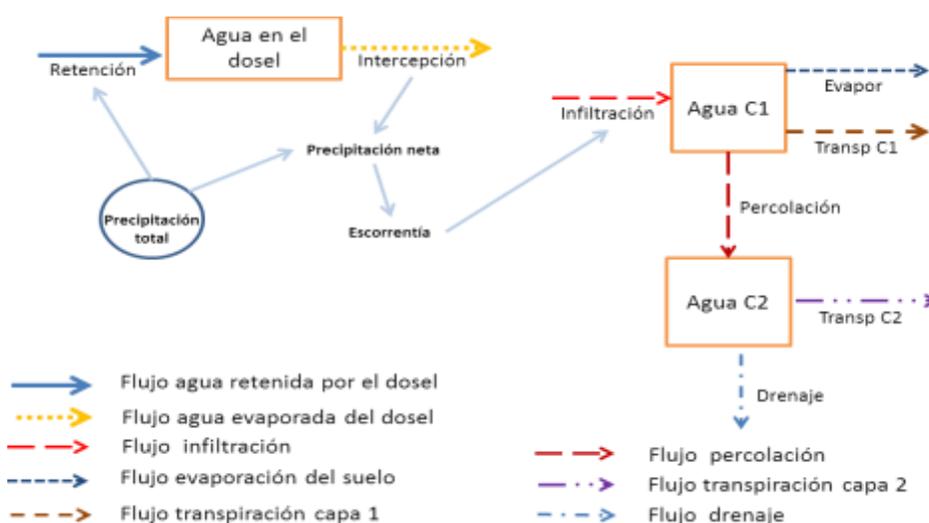


Figura V-12. Estructura del submodelo de balance hídrico del agrosistema plátano, donde se observan los flujos de salidas y entradas de los compartimientos. Vista en VENSIM anexo V-5.

Tabla V-9. Compartimientos, variables y parámetros utilizados en el submodelo de balance hídrico.

Compartimiento			
Símbolo	Significado	Unidad	Referencia
Agua C1	Cantidad de agua en la capa 1 del suelo (0-20 cm)	mm	calculado
Agua C2	Cantidad de agua en la capa 2 del suelo (20-50 cm)	mm	Calculado
Agua en el dosel	Cantidad de agua almacenada en el dosel del cultivo	mm	Calculado
Flujo			
Infiltración	Infiltración	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Evapor	Evaporación desde la capa 1 del suelo	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Transp C1	Transpiración de las plantas desde la capa 1 del suelo	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Transp C2	Transpiración de las plantas desde la capa 2	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Percolación	Cantidad de agua que percola de la capa 1 a la capa 2	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Drenaje	Cantidad de agua que drena desde la capa 2 del suelo	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Retención	Cantidad de agua que retiene el dosel de la planta	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Intercepción	Cantidad de agua que se evapora directamente desde el dosel	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Variables			
Escorrentía	Escorrentía	mm.día <sup>-1</sup>	Medida
Pn	Precipitación neta	mm.día <sup>-1</sup>	Medida
mulch	Mulch		Calculado
CobSuelo	Proporción del suelo cubierto por el dosel		Calculado
FACred2	Factor de reducción de la evaporación del suelo en capa 1		Calculado
Trans total	Transpiración total	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Trans pot 2	Transpiración potencial que incorpora la cobertura del suelo por las hojas de las plantas	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
trans potencial	Transpiración potencial	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
ETPr	Selecciona con una condición el método para el cálculo de la evapotranspiración entre EtoFao o Hargreaves		
Switch1	Determina que ecuación de evaporación va ser utilizada		
FACredC1	y Factor de reducción de la transpiración por disponibilidad de agua de la capa 1 y 2		Calculado
FACredC2			
FACraízC1	y Factor que reparte la transpiración entre las capas 1 y 2 según la cantidad de raíces.		Calculado
FACraízC2			

Tabla V-9. Continuación

Variables				
AguaSuelo C1 y	Cantidad de agua en la capa 1 y	mm		Calculado
AguaSuelo C2	2 de suelo			
Retención potencial	Retención potencial de agua por el dosel	mm		Calculado
K2	Efecto del agua retenida en el dosel sobre la transpiración potencial			Calculado
Parámetros y datos de entrada				
viC1 y viC2	Valor inicial del agua en el suelo de la capa 1 y capa 2	mm		Medido
Prof C1 y Prof C2	Profundidad del suelo para la capa 1 y capa 2	cm		Medido
CC1 y CC2	Valor de capacidad de campo de la capa 1 y 2	cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>		Medido
PMP1 y PMP2	Valor de punto de marchitez permanente de la capa 1 y 2	cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>		Medido
Valor Mulch TCOS	Valor del mulch			
Kc	Coeficiente de evapotranspiración del cultivo			Allen <i>et al.</i> (2006)
K1	Constante para obtener retención potencial por el dosel			Calibrado
K3	Constante para ajustar la evaporación del agua en el dosel			Calibrado
ADW C1	Cantidad de agua del suelo de la capa 1 secado al aire	mm		Medido
r1	Proporción de la precipitación neta que escurre cuando comienza la escorrentía			Calibrado
r22	Umbral a partir del cual comienza la escorrentía	mm.día <sup>-1</sup>		Calibrado
Precipitación	Datos de precipitación	mm.día <sup>-1</sup>		Medido
RC1 y RC2	Porcentaje de raíces en la capa 1 y 2	%		Medido

Tabla V-10. Ecuaciones para describir los procesos del submodelo de balance hídrico.

Símbolo	Ecuación	Número ecuación
dAgua C1/dt	Infiltración – Transp C1 – Evapor – Percolación	Bh-1
dAgua C2/dt	Percolación – Drenaje – Trans C2	Bh-2
dAgua en el dosel/dt	Retención – Intercepción	Bh-3
Infiltración	$P_n - \text{escorrentía}$	Bh-4
Evapor	$Penman * (1 - CobSuelo) * mulch * FACred2 * Kev$	Bh-5
Transp C1	$Trans\ pot\ 2 * FACraízC1 * FACredC1$	Bh-6
Transp C2	$Trans\ pot\ 2 * FACraízC2 * FACredC2$	Bh-7
Percolación	IF THEN ELSE (Agua C1 + Infiltración > CC1*Prof C1 * 10, (Agua C1 + Infiltración) – CC1*Prof C1 * 10, 0)	Bh-8
Drenaje	IF THEN ELSE (Agua C2 + Percolación > CC2 * Prof C2 * 10, (Agua C2 + Percolación) – CC2 * Prof C2 * 10, 0)	Bh-9
Retención	MIN ((Retención potencial – Agua en el dosel), precipitación * CobSuelo)	Bh-10
Intercepción	MIN (Agua en el dosel, EPI * K3)	Bh-11
Escorrentía	MAX (0, (Pn-r22)*r1)	Bh-12
Pn	IF THEN ELSE (precipitación – Intercepción >= 0, Precipitación – Intercepción, 0)	Bh-13
mulch	IF THEN ELSE (time > Tcos, 1, ValorMulch)	Bh-14
FACred2	MAX (MIN (Agua C1 – (ADWC1 * Prof C1 * 10)) / ((CC1*Prof C1 * 10) – (ADWC1 * Prof C1 * 10)), 1), 0)	Bh-15
trans total	Transp C1 + Transp C2	Bh-16
Trans pot 2	trans potencial * CobSuelo	Bh-17
trans potencial	MAX ((ETPr * kc * (1 – K2)), 0)	Bh-18
ETPr	IF THEN ELSE (Switch1 = 1, EtoFao, Hargreaves)	Bh-19
FACredC1	MAX(MIN( (Agua C1 – (PMP*Prof C1 * 10)) / ( (CC1 * Prof C1 * 10) – (PMP1 * Prof C1 * 10)), 1), 0)	Bh-20
FACredC2	MAX (MIN( (Agua C2 – (PMP2 * Prof C2 * 10)) / ( (CC2 * Prof C2 * 10) – (PMP2 * Prof C2 * 10)), 1), 0)	Bh-21
FACraízC1	IF THEN ELSE (RC1>0, RC1 / (RC1 + RC2), 0)	Bh-22
FACraízC2	IF THEN ELSE (RC1>0, RC2 / (RC1 + RC2), 0)	Bh-23
Retención potencial	$K1 * (LAI + hLAI)$	Bh-24
K2	MIN (IF THEN ELSE (Retención potencial > 0, Agua en el dosel / Retención potencial, 0), 1)	Bh-25

Además se pudiera considerar el efecto del mulch (cobertura del suelo por la hojarasca y otros residuos vegetales) en disminuir la evaporación del suelo, pero este proceso no fue implementado en la actual versión del modelo por falta de información de campo.

El cálculo de la transpiración desde la capa 1, considera la transpiración potencial, el factor de repartición de la transpiración entre las dos capas de suelo según la proporción de las raíces totales presentes en cada capa y el factor de reducción de la transpiración por la disponibilidad agua en la capa 1. La transpiración potencial o de referencia se estimó partiendo de la variable  $ETPr$ , planteándose dos posibilidades para su cálculo, dependiendo de la información disponible, una es la ecuación de Penman-Monteith modificada por la FAO 56 y la otra es la ecuación de Hargreaves que requiere menos información (Allen *et al.*, 2006) en este caso particular se utilizó la ecuación de la FAO 56. Esta transpiración de referencia, calculada para una cobertura herbácea se corrige considerando un coeficiente del cultivo ( $k_c$ ) que es específico para cada tipo de cultivo y por la cobertura del suelo (ec. Bh-17, 18 y 19). El factor de raíces, que reparte la transpiración entre las capas se calcula diariamente en base al porcentaje de las raíces totales en cada capa de suelo medido experimentalmente (ec. Bh-22). El factor de reducción por disponibilidad de agua en el suelo es muy similar al explicado para la evaporación, con la diferencia de que adquiere el valor de 0 cuando el contenido de agua se iguala al punto de marchitamiento permanente (ec. Bh-20). El factor de reducción por déficit hídrico ( $f(\text{agua})$ ) se consideró igual al factor  $FACredC1$  que es el que reduce la transpiración desde la C1. Esta función se asumió con un comportamiento lineal como se muestra en la figura V-13.

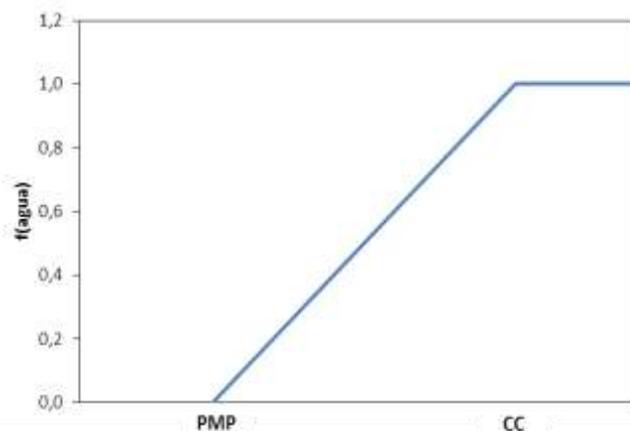


Figura V-13. Comportamiento del factor de reducción de agua en la capa 1 utilizado para reducir la transpiración potencial en función de la disponibilidad de agua en el suelo y que también se utiliza como función de respuesta para reducir la  $PPN_{pot}$  a  $PPN_{real}$  ( $f(\text{agua})$ ).

Finalmente, el flujo de percolación se determinó a partir del agua en la capa uno, la infiltración y la capacidad de campo (CC) (ec. Bh-8), considerando que el agua que excede la CC percola hacia la capa inferior.

El agua en la capa 2, presenta tres flujos uno de entrada y dos de salida (figura V-12), donde la entrada es representada por la percolación desde la capa 1, explicada anteriormente y las salidas se producen por transpiración (ec. Bh-7) y drenaje (Bh-9). La transpiración de la capa 2 utiliza la misma transpiración potencial o de referencia de la capa 1, con diferentes factores de reducción y repartición (ec. Bh-21 y 23). Finalmente el drenaje, se calculó como el agua de la capa 2 que excede la capacidad de campo (ec. bh-9).

El segundo módulo, está compuesto por un compartimiento de agua almacenada en el dosel, con dos flujos uno de entrada que simula la retención en base a una retención potencial calculada con el índice de área foliar de la madre y el hijo y una constante obtenida por calibración (ec. Bh-24) y el flujo de salida de intercepción (ec. Bh-11) que se estimó por medio de la evaporación de agua en el dosel propuesta por Rutter *et al.* (1975), que se basa en el agua almacenada en el dosel y una constante de ajuste de la evaporación.

Así mismo se consideró que cuando el dosel está lleno de agua no ocurre el proceso de transpiración y este comienza a medida que se va secando el mismo para alcanzar su valor potencial cuando el dosel está completamente seco. Para considerar esta influencia del agua retenida en el dosel sobre el flujo de transpiración se calculó el factor  $k_2$  como el cociente entre el agua en el dosel y la retención potencial y este factor se utilizó para reducir la transpiración potencial del cultivo (Ec Bh-18 y Bh-25).

#### **V.2.7. Submodelo de transpiración, evaporación desde el suelo e intercepción potenciales**

Básicamente, los submodelos de evapotranspiración y evaporación se tomaron del trabajo de (Quintero, 2015), (Vista general VENSIM en anexo V-6 y V-7). La evapotranspiración (tablas V-11 y V-12), se calculó siguiendo el procedimiento de la FAO 56 (Allen *et al.* 2006), la evaporación del suelo se estimó por la ecuación de Penman y la evaporación del agua del dosel por la fórmula planteada por Rutter *et al.*, (1975), que se muestran en las tablas V-13 y V-14.

Tabla V-11. Compartimientos, variables y parámetros utilizados en el submodelo de evapotranspiración.

Variables			
Símbolo	Significado	Unidad	Referencia
EtoFao	Ecuación 6, de la FAO 56, Penman Monteith	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Delta	Pendiente de la curva de presión de vapor	Kpa.°C	Calculado
Denominador	Denominador cálculo de pendiente de la curva de presión de vapor		Calculado
eOT	Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire	Kpa	Calculado
Rn1	Radiación neta	MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
Rns	Radiación neta de onda corta	MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
Rnl	Radiación neta de onda larga	MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
Term1, Term2, Term3	Representan tres partes de la ecuación de radiación de onda larga		Calculado
Ea	Presión de vapor actual	Kpa	Calculado
Rso	Radiación cuando el cielo se encuentra despejado	MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
eOTmax	Presión de vapor de saturación a temperatura máxima	Kpa	Calculado
Es	Presión de vapor media	Kpa	Calculado
eOTmin	Presión de vapor de saturación a temperatura mínima	Kpa	Calculado
Psicrométrica	Constante psicrométrica	Kpa.°C	Calculado
P	Presión atmosférica	Kpa	Calculado
Rn1	Radiación neta	MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
Rns1	Radiación neta del suelo	MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
Ra	Radiación extraterrestre	MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	Calculado
Ws	Angulo del sol por hora	Radianes	Calculado
Declinación	Declinación solar	Radianes	Calculado
Dr	Distancia inversa relativa Tierra – Sol		Calculado
Hargreaves	Evapotranspiración por el método de Hargreaves	mm.día <sup>-1</sup>	Calculado
Parámetros y datos de entrada			
Pi	Constante matemática		
Gsc	Constante solar	MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup>	
Lamda	Calor latente de vaporización	MJ.Kg	
Cp	Presión constante de calor específico	MJ.Kg.°C	
Épsilon	Tasa del peso molecular del agua vapor / aire seco		
Lat Rad	Latitud del lugar donde se realiza en experimento.	Radianes	
Albedo Suelo	Albedo del suelo calculado con la fórmula de Bauner		Calculado
Albedo Cultivo	Albedo del cultivo de referencia		Allen <i>et al.</i> (2006)
TMin, TMax, TMed	Temperaturas diarias del lugar	°C	Medido
RHMin y RHMax	Humedad relativa diaria del lugar	%	Medido
U2	Velocidad del viento a 2 metros de altura	m.seg <sup>-1</sup>	Medido
Día	Número del día del año de desarrollo del cultivo (Juliano)		

Tabla V-12. Ecuaciones para describir los procesos del submodelo de evapotranspiración.

Símbolo	Ecuación	Número ecuación
EtoFao 56	$((0.408 * \Delta * Rn1) + (\text{Psicometrica} * (900 / (\text{TMed} + 273)) * U2 * (es - ea))) / (\Delta + (\text{Psicometrica} * (1 + 0.34 * U2)))$	E-1
Delta	$(4098 * eOT) / (\text{Denominador Delta})$	E-2
DenominadorDelta	$(\text{TMed} + 237.3)^2$	E-3
eOT	$0.6108 * (\text{EXP}((17.27 * \text{TMed}) / (\text{TMed} + 237.3)))$	E-4
Rn1	$Rns - Rnl$	E-5
Rns	$(1 - \text{Albedo}) * \text{Rad}$	E-6
Rnl	$\text{Term1} * \text{Term2} * \text{Term3}$	E-7
Term1	$4.903e-009 * (((\text{TMax} + 273.16)^4) + ((\text{TMin} + 273.16)^4)) / 2$	E-8
Term2	$0.34 - 0.14 * \text{SQRT}(ea)$	E-9
Term3	$1.35 * (\text{Rad} / \text{Rso}) - 0.35$	E-10
Ea	$((eOTmin * \text{RHMax} / 100) + (eOTmax * \text{RHMin} / 100)) / 2$	E-11
Rso	$(0.75 + 2e-005 * \text{Elevación}) * \text{Ra}$	E-12
eOTmax	$0.6108 * \text{EXP}(((17.27 * \text{TMax}) / (\text{TMax} + 237.3)))$	E-13
Es	$(eOTmax + eOTmin) / 2$	E-14
eOTmin	$0.6108 * \text{EXP}(((17.27 * \text{TMin}) / (\text{TMin} + 237.3)))$	E-15
Psicometrica	$(Cp * P) / (\text{Épsilon} * \text{lamda})$	E-16
P	$101.3 * (((293 - (0.0065 * \text{Elevación})) / 293)^{5.26})$	E-17
Rnl1	$Rns1 - Rnl$	E-18
Rns1	$(1 - \text{AlbedoSuelo}) * \text{Rad}$	E-19
Ra	$((24 * 60) / \text{Pi}) * \text{Gsc} * \text{Dr} * ((\text{ws} * \text{SIN}(\text{Lat Rad}) * \text{SIN}(\text{Declinación})) + (\text{cos}(\text{Lat Rad}) * \text{cos}(\text{Declinación}) * \text{SIN}(\text{ws})))$	E-20
Ws	$\text{Arccos}(-\text{tan}(\text{Lat Rad}) * \text{tan}(\text{Declinación}))$	E-21
Declinación	$0.409 * \text{SIN}(((2 * \text{Pi}) / 365) * \text{día}) - 1.389$	E-22
Dr	$1 + (0.033 * (\text{cos}(((2 * \text{Pi}) / 365) * \text{día})))$	E-23
Hargreaves	$0.0023 * (\text{TMed} + 17.8) * ((\text{TMax} - \text{TMin})^{0.5}) * (\text{Ra} / 2.45)$	E-24

Tabla V-13. Compartimientos, variables y parámetros utilizados en el submodelo de evaporación.

Variables			
Símbolo	Significado	Unidad	Referencia
Penman	Evaporación del suelo	mm.día <sup>-1</sup>	calculado
ResAerodin	Resistencia aerodinámica		Calculado
Ro	Densidad del aire	Kg.m <sup>-3</sup>	Calculado
P1	Presión atmosférica	Pa	Calculado
EPI	Evaporación del agua interceptada por el dosel	mm.día <sup>-1</sup>	Rutter <i>et al.</i> (1975)
Res Aer Int	Resistencia aerodinámica para el transporte de vapor de agua		Rutter <i>et al.</i> (1975)
Parámetros y datos de entrada			
Const Gas	Constante de las gases		
U10	Velocidad del viento a 10 m de altura	m.seg <sup>-1</sup>	Medido
altura dosel	Altura del dosel	m	Medido

Tabla V-14. Ecuaciones para describir los procesos del submodelo de evaporación.

Símbolo	Ecuación	Número ecuación
Penman	$((\Delta * Rn1 + (Cp * ro * (es - ea)) / ResAerodin) / (\Delta + Psicrometrica)) / lamda$	Es-1
ResAerodin	$(Ln(2 / 0.01))^2 / ((0.41^2) * U2)$	Es-2
Ro	$P1 / (ConstGas * (TMed + 273) * 1.01)$	Es-3
P1	$P * 1000$	Es-4
EPI	$(\Delta * Rn1 + (ro * Cp * (es - ea) / Res Aer int)) / (lamda * (\Delta + Psicrométrica))$	Es-5
Res Aer int	$(1 / (0.41^2) * U10) * (Ln((10 - 0.75 * altura dosel) / 0.1 * altura dosel))^2$	Es-6

### V.3. Análisis estadísticos del modelo

Para evaluar la calibración del modelo se empleó el porcentaje del error cuadrático medio (% RMSE) para determinar diferencias relativas entre los valores simulados con los valores observados de los compartimientos de la planta madre y planta hijo y el índice de área foliar. Así mismo, se evaluaron el nitrógeno en la biomasa de la planta madre y el hijo, nitrógeno mineral, humedad del suelo, precipitación neta, escorrentía e infiltración, como indica con la fórmula que se muestra a continuación (Rinaldi *et al.*, 2007):

$$\%RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{M}$$

Donde:

- P<sub>i</sub>, es el valor simulado de la variable en estudio
- O<sub>i</sub>, es el valor observado de la variable en estudio
- M, es la media de la variable observada

Rinaldi *et al.* (2007), indican los porcentajes para comparar los %RMSE normalizados, obtenidos de los resultados de las variables simuladas son los siguientes:

Calificación	Rango de %RMSE
Excelente	< 10%
Bueno	> 10 y < 20 %
Regular	> 20 y < 30 %
Malo	> 30 %

Cabe enfatizar que solo podemos evaluar la calibración del modelo ya que no disponemos de un set de datos independientes para realizar una validación, la cual queda pendiente como próximo paso del proceso de modelización.

#### V.4. Calibración del modelo

La calibración de los coeficientes requeridos para el funcionamiento de los diferentes submodelos fue realizada por tres procedimientos:

##### V.4.1. Búsqueda en la bibliografía

Por esta vía se obtuvieron algunos parámetros como el coeficiente de extinción de la luz del cultivo de plátano, el coeficiente de cultivo utilizado para la transpiración, la proporción PAR/Rad, la relación C/N de la biomasa microbiana, entre otros. Para el caso del coeficiente de respiración ( $q_{CO_2}$ ) se usó como referencia los trabajos de Felicien (2009) y Valery (tesis en elaboración), el primero para suelos agrícolas del Páramo Andino un coeficiente de 0,03 y el segundo para suelos de El Vigía, que para este caso se ajustó mejor al valor de 0,06 dado por este. En la tabla V-15 se presenta los parámetros que fueron obtenidos de la literatura y su respectivo valor.

Tabla V- 15. Parámetros obtenidos de la bibliografía.

Parámetro	Valor	Fuente
K, hK	0,46	Turner (1994)
Kc	1,1	Allen <i>et al.</i> (2006)
PAR/Rad	0,48	Tsubo y Walker (2005)
C/N BM	10	Sarmiento (1995)
%C	40	Gayoso y Guerra (2005)
$q_{CO_2}$	0,06	Valery (sin publicar)
Q10	2	Alvin, (1952)
Albedo Cultivo	0,23	Allen <i>et al.</i> (2006)
Cons Gas	287 j.kg <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup>	Allen <i>et al.</i> (2006)
landa	2,45 MJ.kg	Allen <i>et al.</i> (2006)
cp	0,001013 MJ.kg.°C	Allen <i>et al.</i> (2006)
Epsilon	0,622	Allen <i>et al.</i> (2006)
Pi	3,1416	Allen <i>et al.</i> (2006)
Gsc	0,082 MJ.m <sup>-2</sup> .día	Allen <i>et al.</i> (2006)

##### V.4.2. Calibración automática

Algunos parámetros que adquieren un solo valor a lo largo del desarrollo del cultivo pero que no pudimos obtener de la literatura fueron calculados utilizando las herramientas de optimización automática que ofrece el programa VENSIM, con el criterio de reducir la distancia entre los valores simulados y las variables medidas. Este procedimiento también podría ser definido como una calibración inversa. Con este procedimiento se ajustaron los parámetros de K1, r1 y r22 del submodelo de balance hídrico (tabla V-9) y Kho, Kse, Kra, Kbm, Kh del submodelo de descomposición (tabla V-7), debido a que fue incorporado en etapa posterior al planteamiento y

ejecución del trabajo de campo, presenta coeficientes que no se tiene información, por tanto se incorporó información general de experiencias de trabajos previos de la tutora en otros cultivos y agroecosistemas y luego se ajustó por optimización. Se realiza en la ventana de optimización, con la selección del parámetro y se establece un rango de valores entre los que puede oscilar el parámetro y al iniciar la optimización el programa busca la mejor respuesta del modelo y al final de la misma, da un reporte con la información del ajuste obtenido y el mejor valor del parámetro. En la tabla V-16, se presenta el valor de los parámetros que fueron obtenidos por optimización.

Tabla V-16. Parámetros optimizados con VENSIM

Parámetro	Valor
K1	1,19 lt.m <sup>-2</sup>
r1	0,892393
r22	10,14 mm
Kho	0,03 día <sup>-1</sup>
Kse	0,02 día <sup>-1</sup>
Kra	0,01 día <sup>-1</sup>
Kbm	0,05 día <sup>-1</sup>
Kh	0,00012 día <sup>-1</sup>

#### V.4.3. Calibración manual

Este procedimiento se utilizó para obtener los coeficientes de asignación de la biomasa a los órganos entre otros coeficientes, los cuales son variables a lo largo del tiempo. Este es un proceso bastante tedioso que implica ir variando manualmente los coeficientes y observar gráficamente el efecto de forma reiterada, hasta obtener un resultado visualmente satisfactorio. Estos valores se introducen en variables auxiliares creadas para cada coeficiente y conectadas a cada compartimiento (órgano), utilizando la función gráfica de entrada (Graphical Input) con la selección del tipo With Lookup y luego Graph, que permite introducir los valores en una tabla o gráfico en los intervalos de tiempo considerados, en este caso, se asignaron los valores a los tiempos que se corresponden con los muestreos de campo, se corre el programa, que realiza una interpolación lineal en los tiempos intermuestrados y se observa la respuesta en la variable, si no es satisfactoria se vuelve a realizar el procedimiento.

A continuación explicamos con más detalle el proceso de calibración de cada submodelo.

##### V.4.3.1. Submodelo planta

Como ya se mencionó, la calibración del submodelo de planta madre y el hijo, consistió en la optimización a través de un proceso interactivo que permitió ir variando los coeficientes y

realizar una evaluación visual de la bondad de ajuste de las curvas simuladas de la biomasa de los diferentes órganos, con los puntos de los valores medidos en los muestreos de campo, para modificar los coeficientes de partición de los asimilados entre órganos, translocación inicial desde el cormo a las hojas, seudotallo y raíces y luego la translocación de los diferentes órganos, hacia el llenado del racimo y las tasas de mortalidad producto de actividades de manejo del cultivo principalmente.

Los coeficientes de partición de asimilados representan la proporción de la PPN que es asignada a cada compartimiento de la planta madre a lo largo del ciclo de crecimiento, estos coeficientes presentan valores entre cero y uno y la suma de todos debe ser uno, por tal razón el coeficiente de la raíz se obtuvo por diferencia.

En términos generales puede observarse que los coeficientes resultantes del proceso de calibración manual (figura V-14) se ajustaron a las etapas planteadas del desarrollo de la planta, una primera donde se produce una asignación estable para las hojas, seudotallo, cormo y raíz. Luego en la etapa reproductiva se produce el crecimiento exponencial con aumento en los coeficientes de hoja, seudotallo y cormo y se observa una disminución de la asignación a las raíces, para terminar luego asignando casi en su totalidad los asimilados para el llenado del racimo a medida que se acerca la cosecha, donde producto de la senescencia de la planta la PPN presenta valores mínimos.

En la figura V-14, las líneas de color rojo son los resultados obtenidos por calibración manual y son los que fueron introducidos en el modelo. Su forma un poco irregular puede obedecer a las variaciones experimentales en la estimación de la biomasa. Se presentan en líneas punteadas una estilización o generalización de las curvas para mostrar mejor las tendencias. Un paso que se podría incluir en una próxima versión del modelo sería buscar funciones matemáticas que describan adecuadamente los cambios temporales en la distribución de asimilados.

Luego que el hijo comienza a desplegar sus hojas, se ajustan los coeficientes de partición de asimilados de la PPN a sus compartimientos (figura V-15), que nos muestra un comportamiento enfocado a continuar con la formación de estructuras de absorción y asimilación, para acelerar las funciones de captación, muy diferente al cormo y seudotallo que presenta una asignación más uniforme a lo largo del período evaluado, que luego de la emergencia de la bellota en la planta madre, se inicia la etapa de acumulación por lo que los compartimientos de reserva muestran una tendencia a tomar mayor importancia.

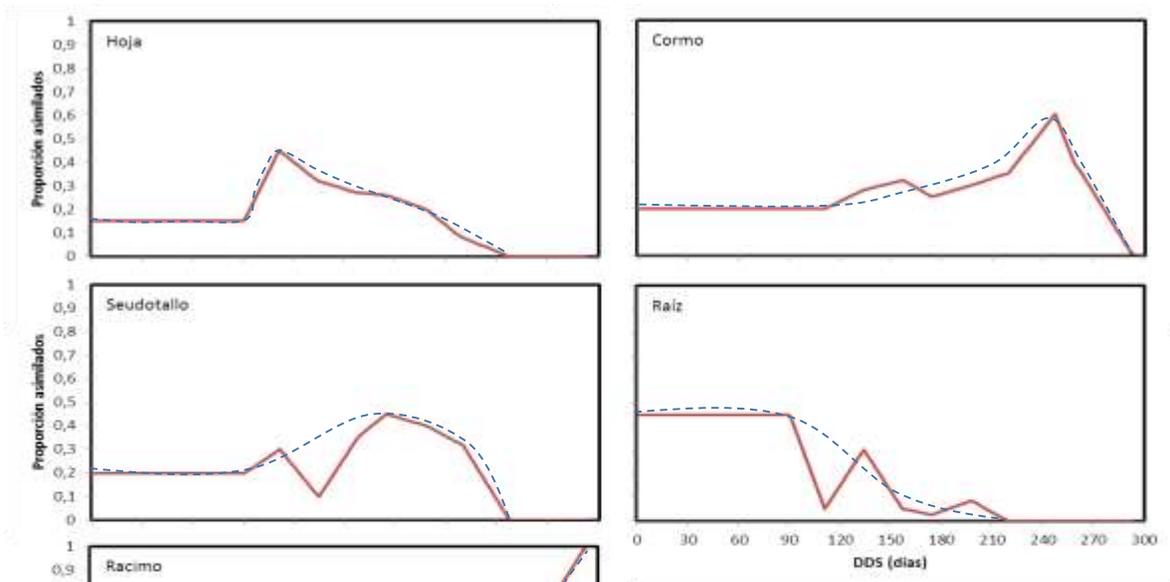


Figura V-14. Coeficientes de partición de asimilados de la PPN a los diferentes órganos de la planta madre de plátano obtenidos por calibración (curva roja). La curva punteada representa una generalización o estilización de la curva obtenida por calibración.

www.bdigital.ula.ve

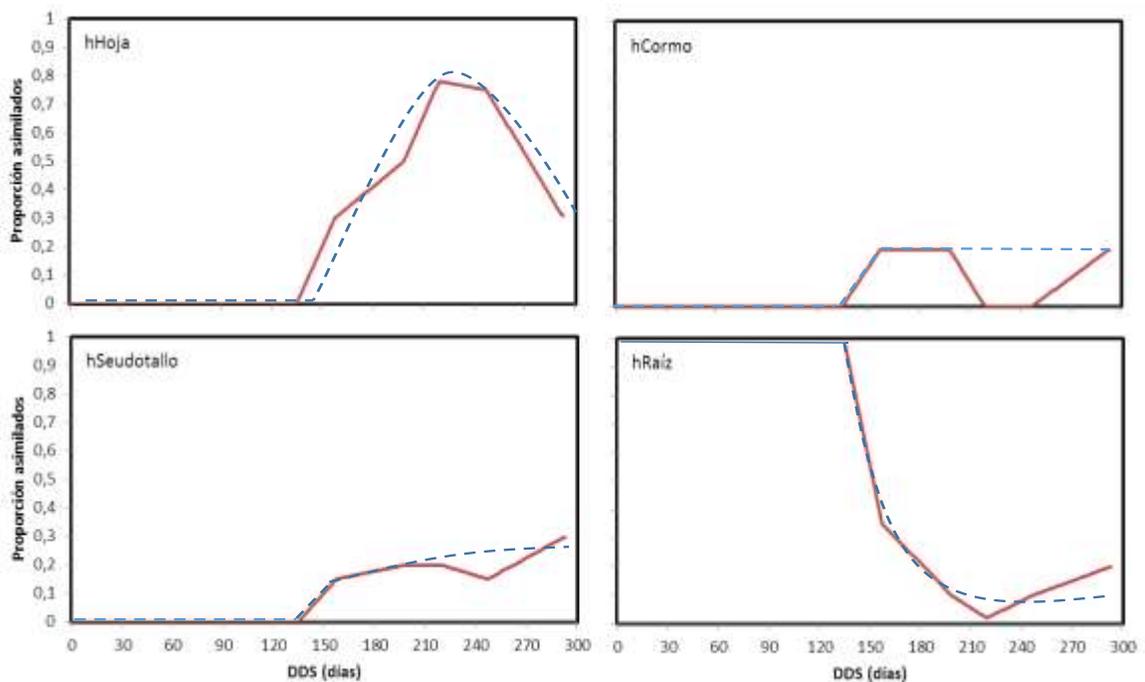


Figura V-15. Coeficientes de partición de asimilados de la PPN del hijo a los diferentes órganos de la planta hijo de plátano obtenidos por calibración. Las líneas puntuadas muestran una generalización de la tendencia.

Las tasas de asignación de los asimilados del cormo madre a los compartimientos de hoja yseudotallo, se calibraron a un valor constante a lo largo del ciclo por el orden de 0,3 y 0,04, respectivamente. Los compartimientos de raíz, racimo, hijo e hijos extra (figura V-16), variaron en el tiempo y el compartimiento de la raíz solo recibió durante un corto período al inicio del ciclo a diferencia del resto y donde la hoja fue el principal compartimiento receptor, comparado con el resto de órganos.

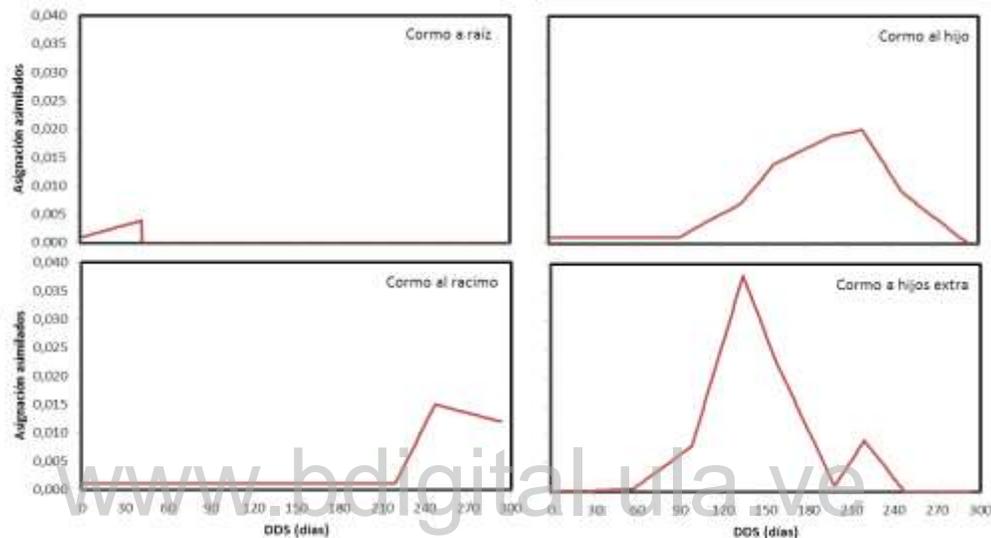


Figura V-16. Coeficientes de asignación de asimilados del cormo madre a los compartimientos de raíz, racimo, al hijo y los hijos extra de la planta de plátano obtenidos por calibración. En este caso el coeficiente de asignación representa la proporción de la biomasa del cormo que diariamente es transferida a los otros órganos.

Las tasas de asignación de los asimilados del cormo hijo a los compartimientos de hoja, pseudotallo, raíz, nieto y nietos extra se muestran en la figura V-17, resalta que durante este período de evaluación la asignación a las raíces presenta un valor alto, seguido del pseudotallo.

También podemos suponer que la asignación del cormo madre y el hijo a los otros compartimientos es distinta debido a la diferencia de funciones durante las etapas iniciales de crecimiento de estas plantas que presentan prioridades de asignación de asimilados diferentes.

Las tasas de mortalidad de la biomasa aérea se calcularon en base a los datos de fitomasa recolectada durante la aplicación de las prácticas agronómicas de deshoje y deshije y calibradas luego durante el proceso interactivo junto con los otros coeficientes, el resultado para los compartimientos de la planta madre y el hijo se observa en la figura V-18 y tabla 17, donde se observa que la mayor tasa la presenta la hoja, que para el caso de la madre se observa una fuerte

disminución de ésta durante la etapa reproductiva. Estas tasas de mortalidad sólo entran en juego los días en que se realiza una actividad de poda, que en el caso de nuestra plantación fueron quincenales. Para el compartimiento de la raíz, como no se tiene información sobre este punto, se calibró a un valor fijo para ambas plantas de 0,0015 y al cormo no se le asignó tasa de mortalidad.

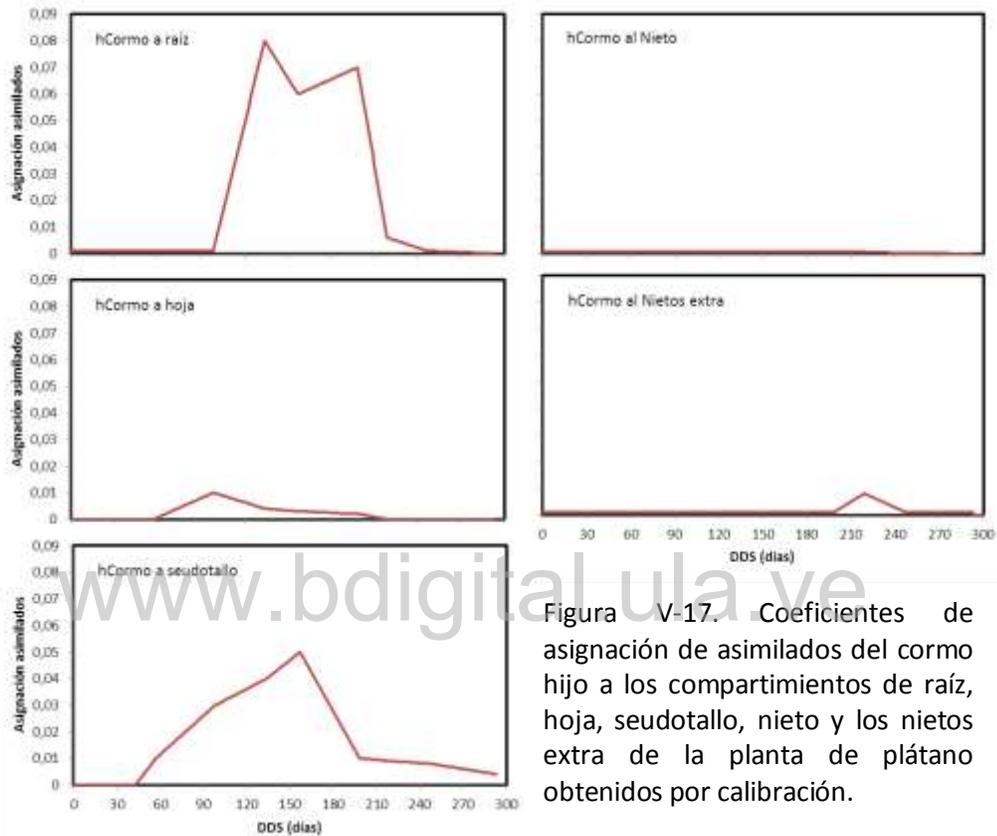


Figura V-17. Coeficientes de asignación de asimilados del cormo hijo a los compartimientos de raíz, hoja, seudotallo, nieto y los nietos extra de la planta de plátano obtenidos por calibración.

Tabla V-17. Valores de las tasas de mortalidad de hojas, seudotallo, raíz y racimo de la planta madre y el hijo.

DDS	Madre				Hijo		
	Hoja	Seudotallo	Raíz	Racimo	Hoja	Seudotallo	Raíz
98	0,24	0,02	0,0015				
134	0,25	0,06	0,0015				
157	0,10	0,02	0,0015				
198	0,11	0,01	0,0015				
219	0,10	0,01	0,0015		0,006	0,07	0,0015
247	0,20	0,01	0,0015	0,0001	0,04	0,05	0,0015
293	0,35	0,02	0,0015	0,00005	0,06	0,01	0,0015

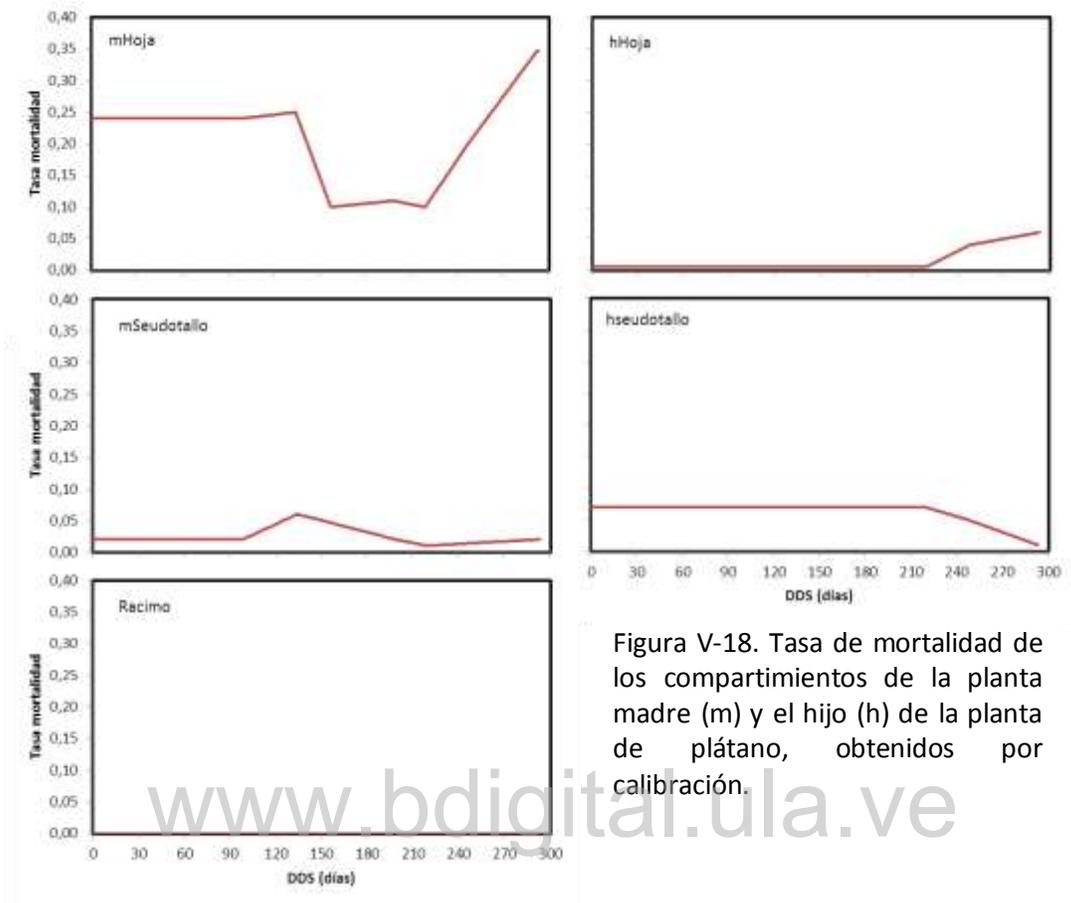


Figura V-18. Tasa de mortalidad de los compartimientos de la planta madre (m) y el hijo (h) de la planta de plátano, obtenidos por calibración.

#### V.4.3.2. Submodelos de nitrógeno, evapotranspiración e interceptación

Los coeficientes de estos submodelos, no fueron calibrados directamente, ya que su simulación depende de variables de los otros submodelos como el de descomposición y balance hídrico para el caso del nitrógeno o dependen de constantes teóricas y datos de entrada particulares del experimento.

### V.5. Información de entrada y datos para la calibración

Para correr el modelo se requiere una serie de datos de entrada que incluyen información climática, valores medidos de concentración de N en la planta y en el agua, entre otros y los datos de acumulación de biomasa y fitomasa del cultivo, flujos hídricos y N mineral del suelo, que se utilizan para calibrar el modelo o para evaluar su desempeño. Esta información se estructuró en tres archivos de Excel, llamados Clima.xls, Balance hídrico.xls y raddiamad.xls. Estos archivos

tienen el paso de tiempo por día y se colocaron los datos en el mismo día en que fueron medidos, para poder luego efectuar las comparaciones respectivas entre los valores medidos y simulados.

El archivo clima.xls contiene la información diaria de la precipitación, temperatura máxima, mínima y promedio, humedad relativa máxima, mínima y velocidad del viento a 2 y 10 m de altura para el intervalo desde la siembra hasta la cosecha de la planta madre.

El archivo de balance hídrico.xls, contiene los datos de flujo caulinar, precipitación neta, interceptación, escorrentía, infiltración, agua en la capa 1 y 2 del suelo y porcentaje de las raíces totales en la capa 1 y 2, así como la acumulación en el tiempo de las variables climáticas.

El archivo raddiamad.xls, consta de toda la información medida en campo de los compartimientos de la planta madre (raíz, cormo,seudotallo, hoja, racimo, necromasa aérea e hijos extra), el hijo (raíz, cormo,seudotallo, hoja, necromasa aérea y nietos extra) y el nieto, nitrógeno en la planta madre, hijo, nieto, porcentaje de nitrógeno en la planta y cormo de la madre y el hijo y el nitrógeno mineral del suelo.

Por otro lado la información de concentración de N en el agua y planta se introdujeron directamente en el modelo utilizando la opción lookup.

## **V.6. Resultados de la simulación con el modelo calibrado**

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la fase de modelización y como se indicó, del calibrado del modelo con la información de campo y bibliográfica de los submodelos de planta madre, planta hijo, balance hídrico, descomposición y nitrógeno.

### **V.6.1. Producción real y potencial y funciones de respuesta**

En la figura V-19, se muestra la eficiencia de uso de la radiación real y potencial (RUE<sub>real</sub> y RUE<sub>pot</sub>), la correlación entre RUE<sub>real</sub> y RUE<sub>pot</sub>, así como las funciones de respuesta al agua (f(agua)) y al nitrógeno (f(N)) utilizadas para el cálculo de la RUE<sub>pot</sub>. Puede observarse que los valores de RUE<sub>pot</sub> se correlacionan linealmente con los de RUE<sub>real</sub>, indicando que en promedio las limitaciones combinadas de ambos factores (agua y nitrógeno) fueron más o menos constantes en el tiempo. La función de respuesta al agua tuvo un valor promedio de 0,87, variando en el intervalo de 0,57 a 1. La función de respuesta al nitrógeno tuvo un valor promedio de 0,90, con mínimo de 0,62 y máximo de 1. Esto indica que ninguno de los factores se hace críticamente limitante y que globalmente el agua pareciera limitar un poco más que el N. El mínimo de ambos

factores, que es el que utiliza el modelo para limitar la PPNpot, alcanzó un valor promedio de 0,82 con un intervalo de variación entre 0,57 y 0,99.

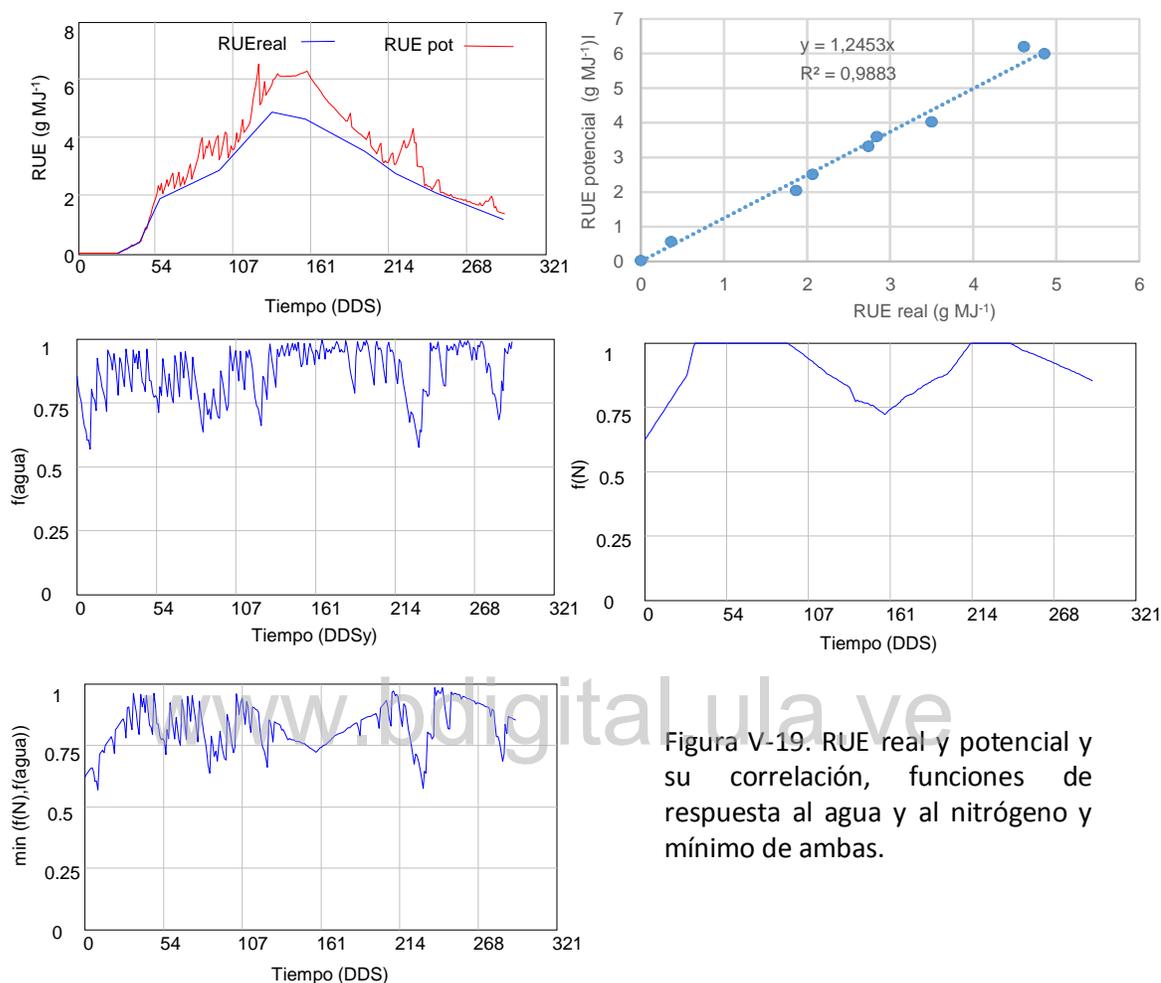


Figura V-19. RUE real y potencial y su correlación, funciones de respuesta al agua y al nitrógeno y mínimo de ambas.

En la figura V-20, se muestra la comparación entre la PPN real y potencial. Puede verse como el modelo nos indica que el cultivo se desarrolló con algunas limitaciones que habrían bajado la producción primaria neta acumulada en el intervalo desde la siembra a la cosecha de un valor potencial de  $3683 \text{ g.m}^{-2}$  a un valor real de  $2867 \text{ g.m}^{-2}$  que representa una reducción del 22%. A nivel del racimo, el modelo predice una producción potencial de  $1060 \text{ g.m}^{-2}$  y una producción real de  $680 \text{ g.m}^{-2}$ , que indica una reducción del 35,85%, mientras que la producción medida en campo, que fue de  $724 \pm 98,06 \text{ g.m}^{-2}$ , tuvo una reducción de 31,70% con respecto al valor potencial calculado. El valor potencial predicho por el modelo para la producción del racimo equivale a  $3530 \text{ g.m}^{-2}$  en peso fresco, que representa  $17,88 \text{ Kg.racimo}^{-1}$ , lo que alcanza a  $35 \text{ Mg.ha}^{-1}$  y lo cosechado en la plantación fue de  $21,7 \text{ Mg.ha}^{-1}$ .

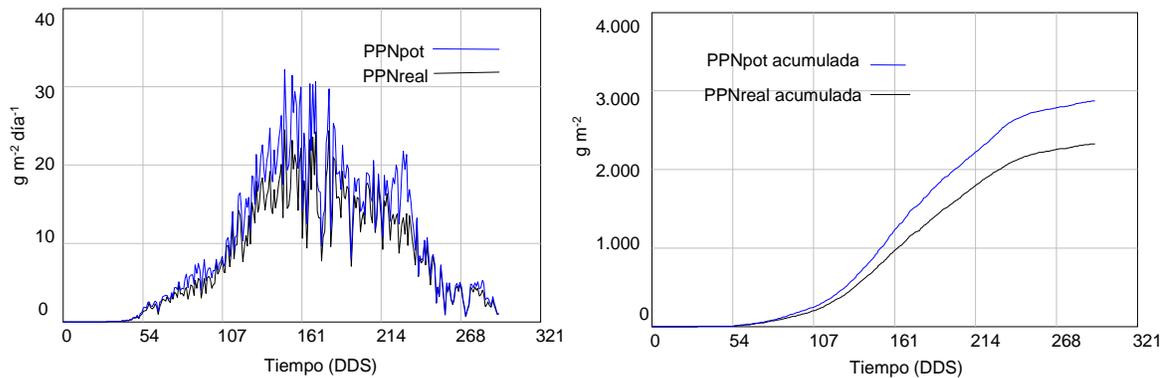


Figura V-20. Producción primaria neta real y potencial de la planta madre por día y acumulada.

### V.6.2. Submodelos de planta madre y planta hijo

A continuación realizaremos una comparación entre los valores simulados por el modelo, una vez calibrado y los valores medidos en el experimento de campo. En general se puede indicar que la comparación de los valores simulados con los observados de las diferentes variables se ubicó en la calificación de excelente a bueno en la prueba del % del error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE). En la figura V-21, se presentan los valores simulados y observados para el índice de área foliar de la planta madre y el hijo con los coeficientes calibrados. Se observa, para el caso de la planta madre que durante la primera mitad del ciclo se produce una sobreestimación del índice, después de la diferenciación floral una subestimación que da como resultado un %RMSE de 11,58 que se califica como bueno y como se aprecia en la figura V-21A, los valores simulados siguen el patrón de los valores observados. Con respecto a la planta hijo (figura V-21B), se presenta un comportamiento similar en el patrón de ambos valores pero en este caso el %RMSE nos indica un valor de 14,39 que se ubica en la mitad del rango de calificación bueno igual a la planta madre.

Los resultados de los siete compartimientos principales de la planta madre (cormo, raíz, hoja,seudotallo, racimo, cormos hijos extra y necromasa aérea), se presentan en la figura V-22, en general se puede indicar que las curvas descritas por los valores simulados, a excepción de la raíz describen un patrón similar a los datos observados en campo. Específicamente, el cormo es el que mejor se ajustó con una calificación de excelente en la prueba %RMSE, luego le siguen los compartimientos de hoja,seudotallo, racimo y necromasa aérea, con una calificación de bueno, el compartimiento de los cormos de los hijos extra con una calificación de regular y la raíz como ya se indicó con la calificación más baja pero que aún está en el rango de regular. Esta concordancia entre la biomasa medida y simulada nos indica que en base al cálculo de la PPNreal que resulta de

la radiación interceptada, el RUEpot, los factores de reducción y utilizando los coeficientes de asignación de asimilados calibrados, es posible reproducir de manera satisfactoria la dinámica de crecimiento del cultivo.

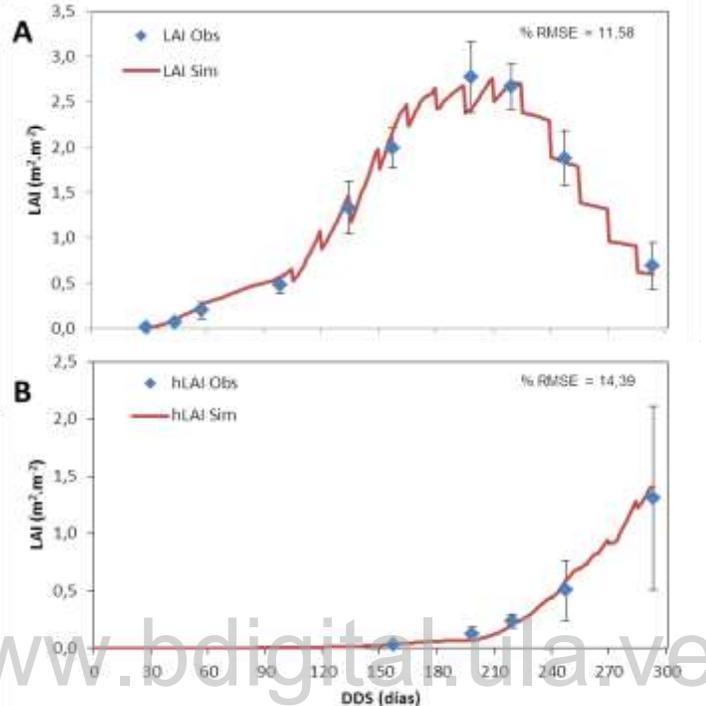


Figura V-21. Índice de área foliar (LAI) observado y simulado para la planta madre (A) y la planta hijo (B) de plátano Hartón. Valor observado (Obs), Valor simulado (Sim), del Error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE). Para los valores observados se presenta la media  $\pm$  DE.

Los resultados de los compartimientos de la planta hijo (cormo, raíz, hoja, seudotallo, nieto, cormos nietos extra y necromasa aérea), se presentan en la figura V-23, en general las curvas de los valores simulados, a excepción de la raíz y el seudotallo, describen un patrón similar a los datos observados en campo. Los compartimientos del cormo, raíz, hoja y nieto se ajustaron a una calificación de buena en la prueba %RMSE, luego le siguen los compartimientos de seudotallo y necromasa aérea con una calificación de regular y el compartimiento de los cormos de los nietos extra con una calificación de deficiente pero apenas por encima del rango (30,2%). La raíz del hijo a diferencia de la madre, con ciertas diferencias entre los valores simulados y observados que se compensa, presenta una mejor calificación en la prueba %RMSE. Particularmente para la planta hijo, hay que mejorar en el modelo los compartimientos de nietos extra, seudotallo y necromasa, que será posible al procesar las muestras de campo del segundo ciclo y tener mayor cantidad de observaciones para tratar de efectuar un mejor ajuste.

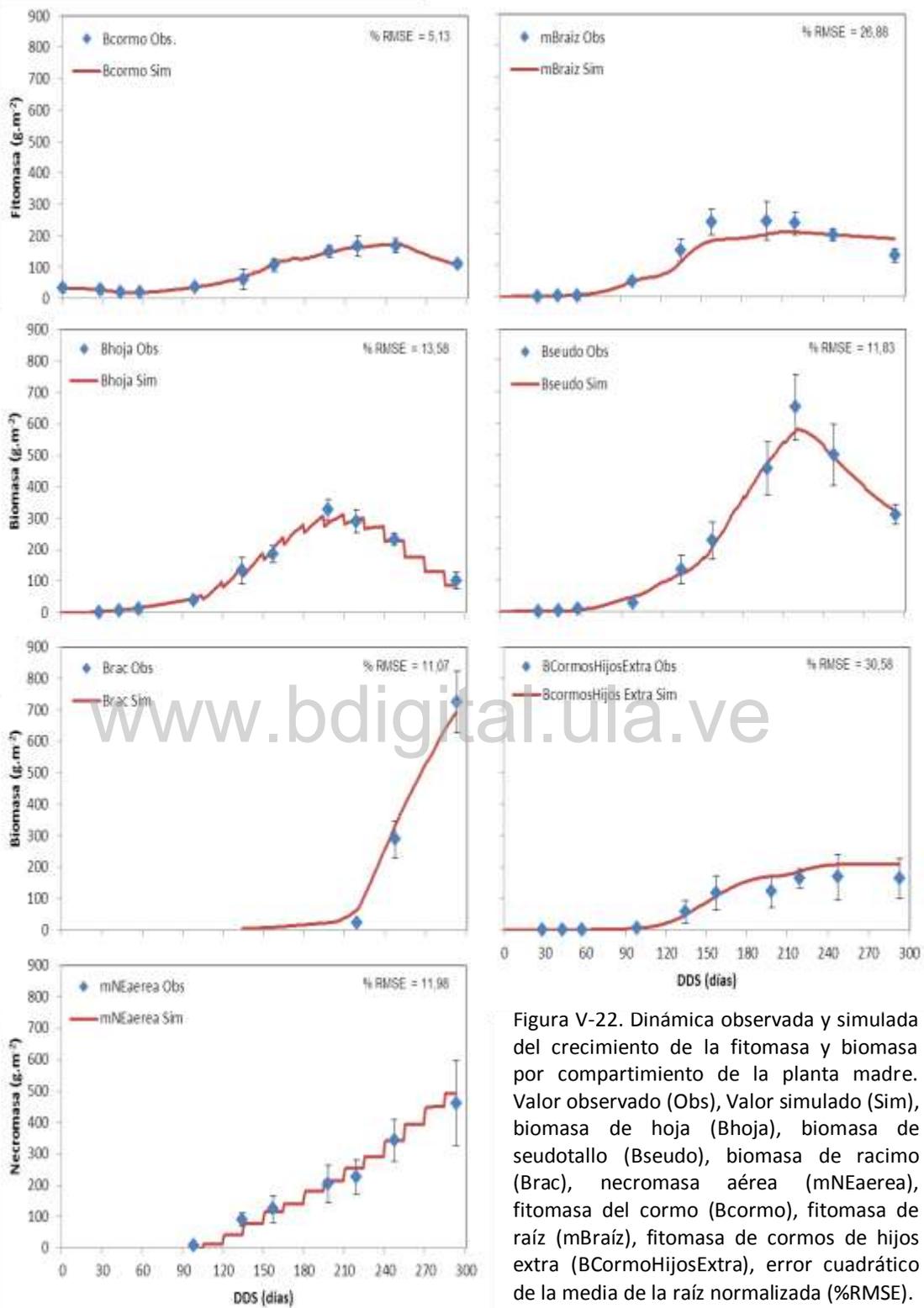


Figura V-22. Dinámica observada y simulada del crecimiento de la fitomasa y biomasa por compartimento de la planta madre. Valor observado (Obs), Valor simulado (Sim), biomasa de hoja (Bhoja), biomasa de seudotallo (Bseudo), biomasa de racimo (Brac), necromasa aérea (mNEaerea), fitomasa del cormo (Bcormo), fitomasa de raíz (mBraíz), fitomasa de cormos de hijos extra (BCormoHijosExtra), error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE).

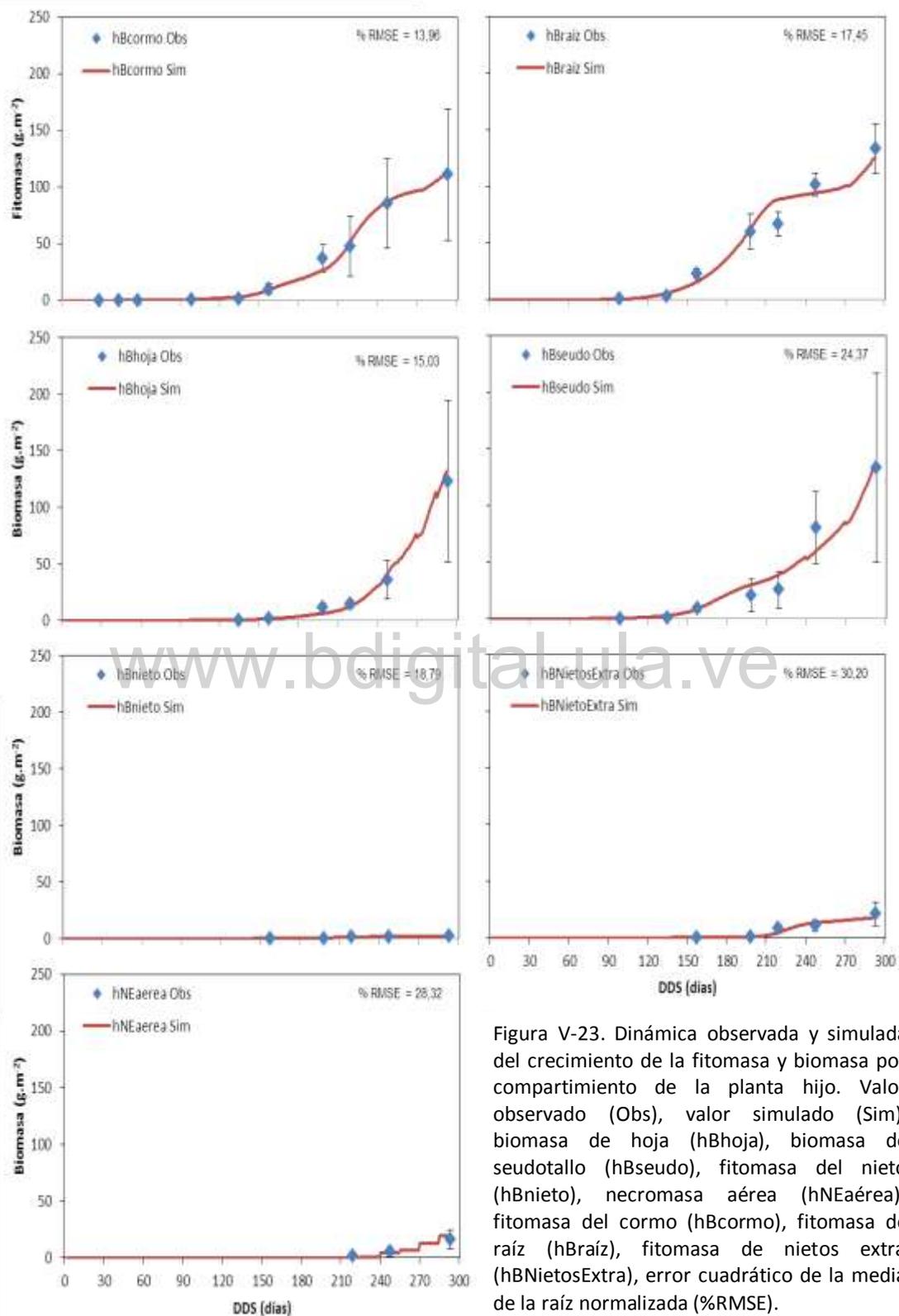


Figura V-23. Dinámica observada y simulada del crecimiento de la fitomasa y biomasa por compartimento de la planta hijo. Valor observado (Obs), valor simulado (Sim), biomasa de hoja (hBhoja), biomasa de seudotallo (hBseudo), fitomasa del nieto (hBnieto), necromasa aérea (hNEaérea), fitomasa del cormo (hBcormo), fitomasa de raíz (hBraíz), fitomasa de nietos extra (hBNietosExtra), error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE).

### V.6.3. Submodelo de balance hídrico

Los resultados de la simulación para las variables precipitación neta, escorrentía, infiltración y humedad del suelo, en términos generales, siguieron el patrón de las variables medidas de manera adecuada, sin embargo, lo que se refiere a la comparación de los valores simulados y los observados no fueron del todo satisfactorios.

La precipitación neta que se muestra en la figura V-24, donde se observa que los puntos simulados se ajustan a los eventos observados pero sus valores difieren en términos de la prueba %RMSE que los califica como regular, ya que el 39% de los valores son sobreestimados en comparación a los observados.

La escorrentía, se presenta en la figura V-24, muestra similar comportamiento entre los valores simulados y los eventos observados, pero el modelo en 20% de los casos subestima el valor observado, como resultado el %RMSE lo califica como deficiente, por lo que en esta variable se debe trabajar más en los parámetros asociados a esta variable para tratar de conseguir un mejor ajuste.

La infiltración (figura V-24), presenta al igual que la precipitación neta valores sobreestimados en comparación a los observados en un 44%, que lo califican en términos del %RMSE como deficiente, producto de los problemas observados en sus variables asociadas ya que su obtención es la resta entre ellas (Ec. Bh-4).

El drenaje simulado se presenta en la figura V-25, donde se observa que durante los primeros meses el modelo no simuló drenaje, similar a lo observado en campo durante los pocos meses de observación de los lisímetros instalados y de los valores simulados se puede presumir que no son exagerados ya que al final del ciclo del cultivo se acumuló la cantidad de 384,6 mm que representa el 17,93% de la precipitación total, similar al 12% calculado por el balance hídrico (figura III-22).

El contenido de agua en el suelo en las capas evaluadas se muestra en la figura V-26. Los resultados de la capa 1 (figura V-26A), nos indican que a pesar de las diferencias visuales entre la curva simulada y los puntos observados, el %RMSE lo calificó como excelente. Por el contrario en la capa 2, se observa una mayor diferencia visual entre los valores y el %RMSE lo califico como bueno, por lo tanto la simulación del agua en el suelo actual, permite trabajar con el modelo, sin embargo, hay que poner mayor énfasis en la capa 2, también se observa que el agua simulada, en las capas varía rápidamente con las variaciones de la precipitación y como se indicó anteriormente, se necesita incorporar mayor número de valores observados para incrementar la

precisión del modelo y estimar las fluctuaciones de la humedad en períodos de tiempo menores, dado que esta variable influye en los otros submodelos.

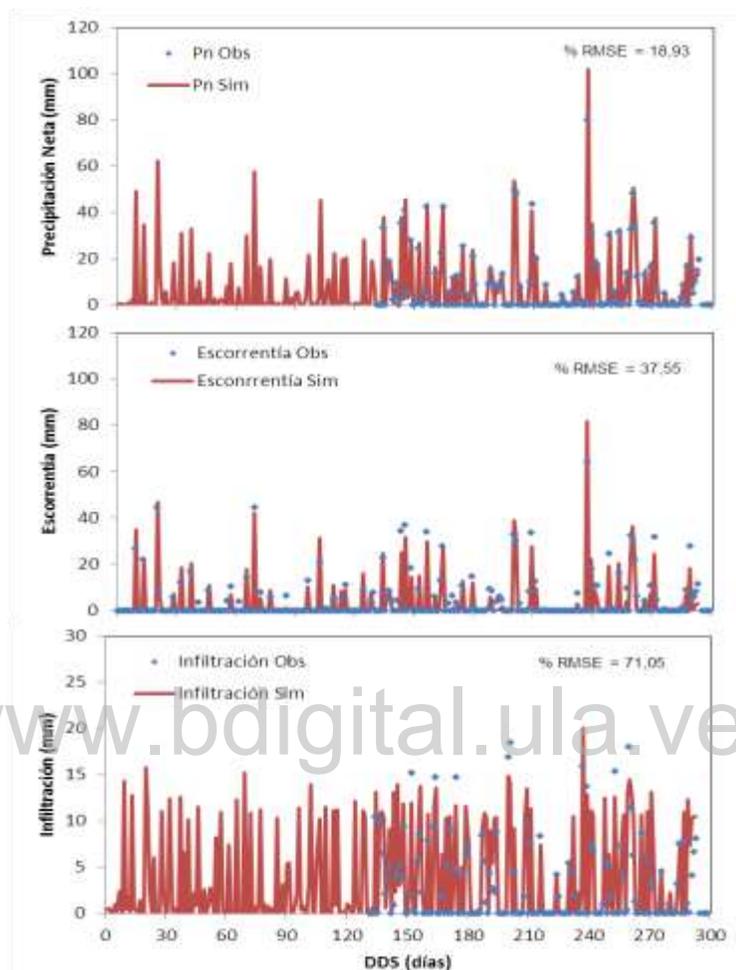


Figura V-24. Precipitación neta, escurrentía e infiltración, para los valores observados (Obs) y simulados (Sim), durante el período de evaluación. El desfase en las curvas de precipitación neta e infiltración se debe a período no medido. Error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE).

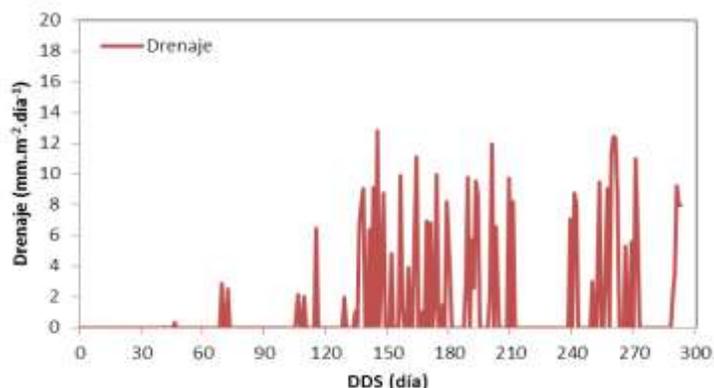


Figura V-25. Drenaje simulado del agroecosistema plátano

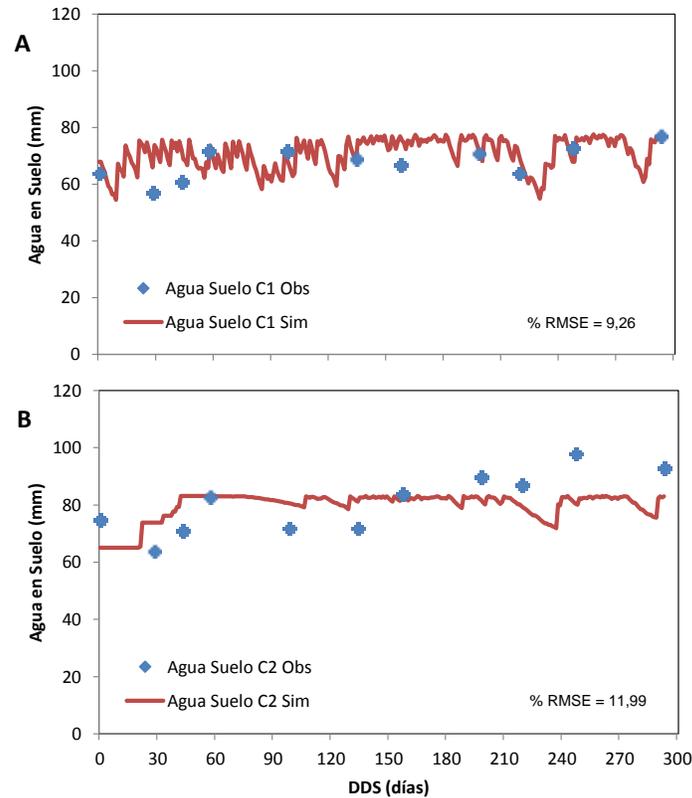


Figura V-26. Valores observados (Obs) y simulados (Sim) del contenido de agua en el suelo en la capa 1 (A) y en la capa 2 (B). Error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE).

#### V.6.4. Submodelo de nitrógeno

En la figura V-27, se muestra la dinámica del  $N_{min}$ , observándose que el modelo no logra simular el detalle de la dinámica de esta variable, aunque los valores simulados en promedio se mantienen en el rango de los observados. Por otro lado, los valores observados presentan una desviación estándar muy alta en casi todos los muestreos, lo que nos indica la dificultad de seguir esta variable que está sujeta a una heterogeneidad espacial alta debido a la forma de aplicación del fertilizante, por lo cual es de esperarse que los valores medidos tengan un error relativamente alto, que dificulta la evaluación del desempeño del modelo. El %RMSE califica la simulación del  $N_{min}$  como deficiente. Puede observarse como el modelo simula tres picos de nitrógeno mineral que están asociados a los tres eventos de fertilización, de los cuales solo dos se detectaron en campo, aunque como las mediciones se hicieron días después de la fertilización el máximo del pico no fue medido. En la parte final de la simulación, después de la última aplicación del fertilizante, los valores simulados siguen bastante bien a los observados pero al final de la simulación el suelo queda sin nitrógeno mineral, lo que nos indica que se podría estar subestimando la mineralización.

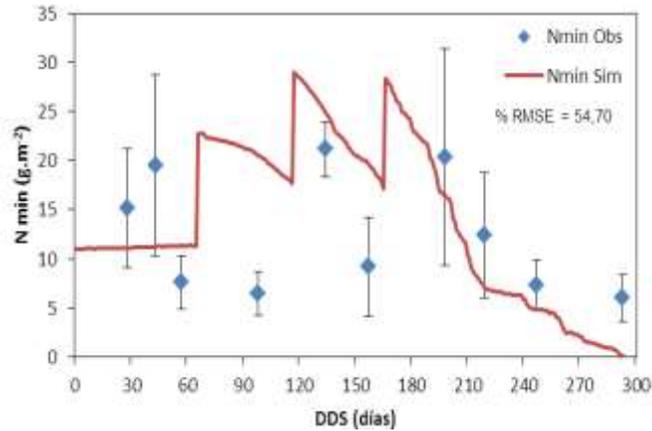


Figura V-27. Nitrógeno mineral total observado (Obs) y simulado (Sim) del suelo de la plantación de plátano Hartón. Error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE).

Con respecto al nitrógeno en la biomasa de la planta madre y el hijo, los resultados se presentan en la figura V-28, donde se observa que para ambas plantas, la curva simulada describe la tendencia de los datos observados. Sin embargo, la simulación del nitrógeno en la planta madre presenta durante todo el ciclo valores subestimados comparados con los observados con un %RMSE regular, tal vez por una subestimación del nitrógeno disponible en el suelo. La planta hijo presentó valores más cercanos y es lo que se refleja en el %RMSE, aunque se ubicó igual que la madre, en la calificación de regular. Aquí es importante mencionar que esto puede ser un reflejo de la fitomasa de raíz que fue el compartimiento con menor ajuste en la madre y regular en el hijo.

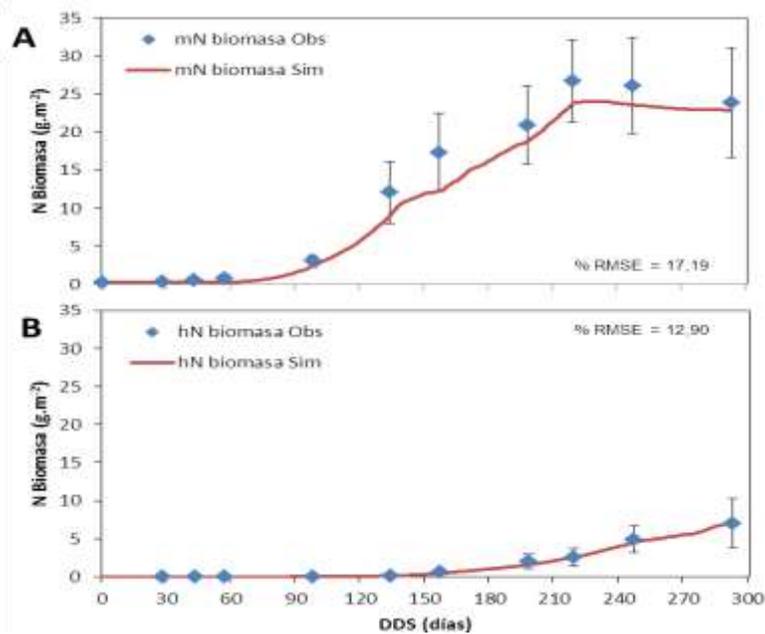


Figura V-28. Nitrógeno observado (Obs) y simulado (Sim) en la Biomasa de la planta madre (A) y planta hijo (B). Error cuadrático de la media de la raíz normalizada (%RMSE).

El nitrógeno lavado se presenta en la figura V-29 aunque no se puede comparar con valores medidos. Se observa que las mayores pérdidas ocurren asociadas a los altos eventos de drenaje, con un valor máximo de  $1,31 \text{ gN.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ , pero luego, al disminuir el nitrógeno en el suelo, disminuye la pérdida, que alcanzó un valor acumulado al final del ciclo del cultivo de  $19,74 \text{ g.m}^{-2}.\text{ciclo}^{-1}$ , información que como se indicó fue incorporada al cálculo del balance de nitrógeno en el capítulo III.

Si recordamos, fueron planteados dos factores alternativos de reducción de la PPN por limitación de N, el primero ( $f(N)$ ) basado en el INN, el cual requiere conocer la concentración de N en la planta como dato de entrada, lo cual es una limitación a la hora de utilizar el modelo. El segundo factor,  $f(N_2)$ , se basa en el N mineral del suelo, lo cual sería una ventaja al ser una variable simulada. Los resultados del modelo son muy diferentes según se utilice uno u otro factor (hasta ahora hemos mostrado los resultados con  $f(N)$ ). El factor  $f(N_2)$  es más restrictivo, es decir produce una limitación mayor (figura V-30). Para que el factor  $f(N_2)$  produzca resultados más acordes con la realidad la eficiencia de absorción ( $E_{fi \text{ abs}}$ ) debe ser multiplicada por 1,43, lo que indicaría que la ecuación planteada con la curva envolvente (figura V-8) podría estar subestimando esta eficiencia. Este desempeño mediocre del factor  $f(N_2)$  nos indica que es necesario profundizar en el conocimiento del proceso de absorción de N por la planta y su relación con la cantidad de raíces y la concentración de  $N_{min}$ . Por otro lado, como se basa en los valores simulados de  $N_{min}$  que presentan limitaciones para su simulación, debe seguirse con su evaluación en posteriores investigaciones y el factor de reducción  $f(N)$ , aunque da mejores resultados pero como se basa en una ecuación propuesta en este trabajo igualmente debe ser probada para la generalización del modelo.

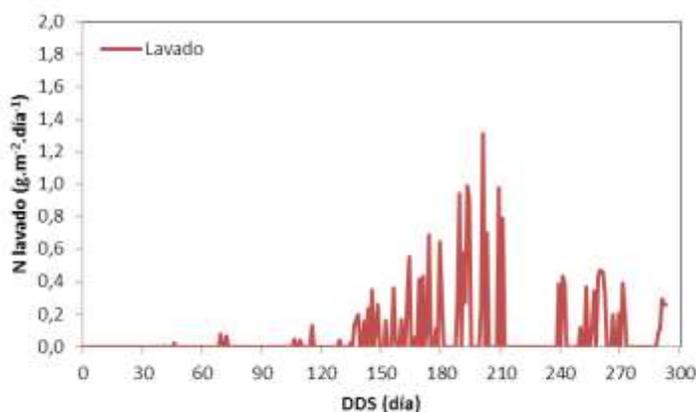


Figura V-29. Nitrógeno lavado simulado del agroecosistema plátano.

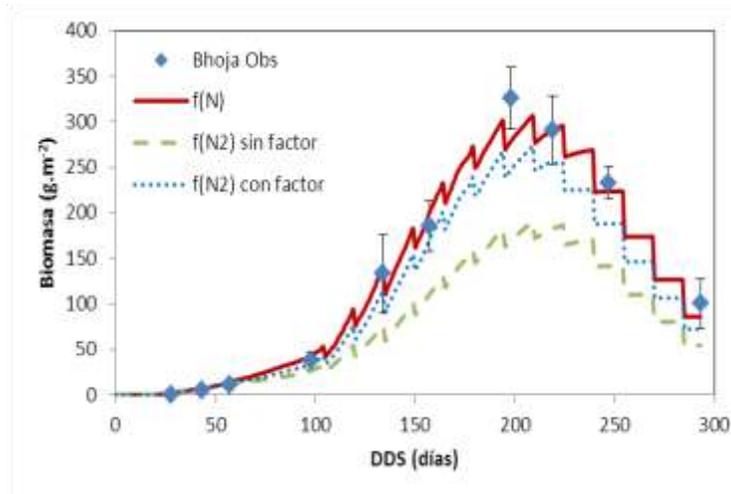


Figura V-30. Dinámica observada (Obs) y simulada con cada uno de los factores de reducción de N del crecimiento de la biomasa de las hojas (Bhoja) de la planta madre.

#### V.6.5. Submodelo de descomposición

El submodelo de descomposición es el que menos información tiene para comparar debido a que la mayor parte de sus parámetros son tomados de otros trabajos y no se evaluó en campo. Sin embargo, la única variable que se puede comparar con los valores observados, es el nitrógeno en los sedimentos (figura V-31), que nos muestra que la tendencia de los datos simulados sigue los observados pero no en sus valores, reflejado en una calificación de la simulación ligeramente deficiente, por lo tanto, como ya se ha comentado es muy importante determinar los parámetros de este submodelo localmente ya que influye directamente en el balance de N.

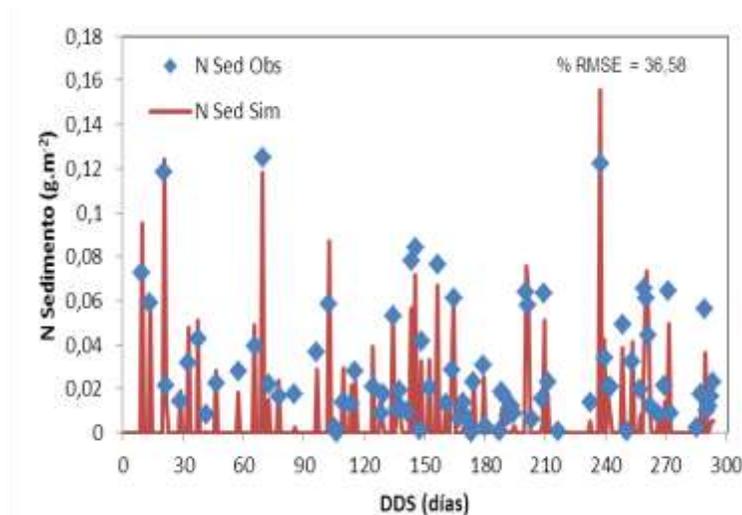


Figura V-31. Nitrógeno en sedimento simulado del agroecosistema plátano

## V.7. Discusión

El modelo del agroecosistema plátano que hemos descrito y calibrado, tal como está planteado actualmente, permite la simulación del crecimiento de la planta de plátano para el primer ciclo de producción, parte del ciclo del hijo y nieto, e incluye la simulación del balance hídrico y de nitrógeno, utilizando datos de entrada climáticos, de suelo, de manejo y de la concentración de nitrógeno en el agua y en la planta madre. Con esta información el modelo fue calibrado satisfactoriamente en términos generales. Para su generalización a otras condiciones y su utilización en la evaluación de prácticas de manejo del cultivo (fertilización, riego, deshije) y para la estimación de la producción en plantaciones de diferente lapso comercial (anual o perenne), bajo diferentes condiciones agroecológicas, sería necesario, además del proceso de validación, mejorar algunos aspectos de la estructura del modelo. Los datos proporcionados por el experimento de campo fueron incorporados casi en su totalidad para la calibración del modelo. Sin embargo, el proceso de modelización reveló carencias de información en algunos aspectos importantes, como por ejemplo en la dinámica de descomposición de los residuos del cultivo, que es necesario incorporar para poder calibrar los parámetros de este submodelo. Asimismo, el submodelo de nitrógeno, tal como está planteado, requiere de información de entrada que es difícil de adquirir y limita la utilización del modelo, por lo cual es imperativo, en futuras versiones, independizarse de esa información de entrada, haciendo que el modelo pueda calcular las concentraciones de nitrógeno en los diferentes flujos de agua. A continuación discutiremos con más detalle los diferentes aspectos del modelo y señalaremos las limitaciones a superar en futuras versiones y la investigación que surge como prioritaria para tal fin.

### V.7.1. Producción real y potencial

La producción potencial se calculó, como lo hacen muchos modelos reportados en la literatura, en base a la radiación fotosintéticamente activa (PAR) utilizando la ley de Beer-Lambert para calcular la radiación interceptada y la eficiencia de uso de la radiación (RUE) para transformar esa radiación interceptada en producción primaria neta potencial (Monteith, 1965, Pierce y Running 1988, Nel y Wessman, 1993, Vose *et al.*, 1995, Aubin, 2000), la cual es posteriormente limitada por la disponibilidad de agua o de nitrógeno para obtener la producción primaria neta real (Bleken *et al.*, 2009). El único dato de entrada para este cálculo es la radiación total diaria incidente, que es una variable medida en forma rutinaria en muchas estaciones climáticas. A pesar de la sencillez del enfoque, el resultado obtenido depende de diversos parámetros como la

relación PAR/Rad, el coeficiente de extinción de la luz, los valores de RUE potencial, así como de la adecuación de las dos funciones de respuesta utilizadas para considerar las limitaciones de agua y nitrógeno.

Con respecto al coeficiente de extinción de la luz ( $k$ ), también llamado por algunos autores coeficiente de atenuación de la luz, este representa la capacidad del dosel para interceptar la luz y depende de la estructura del dosel, incluyendo la distribución del follaje, el ángulo de las hojas, la densidad de siembra, la altura, la pigmentación, etc. En la literatura se reportan pocos valores específicamente para musáceas, entre los cuales podemos mencionar en banano a Nyombi (2010) que utilizó 0,7 y Chaves *et al.* (2009) en plátano Dominicó que considera 0,2817, que en ambos casos contrasta con el propuesto por Turner (1994) de 0,46 y el cual fue el utilizado en este modelo, el cual puede representar un valor intermedio entre los utilizados por estos autores y el valor mínimo en el rango reportado por Turner (1990) para banano entre 0,46 a 0,75, por lo que este parámetro se tendrá que calcular localmente como propone Turner (1990) y Nyombi (2010), para adaptarlo a las condiciones de la región y del clon. La sensibilidad del cálculo de la radiación interceptada a este parámetro  $k$  es relativamente alta por lo cual vale la pena intentar obtener un valor más certero. Sin embargo, como la RUE potencial del cultivo se calculó utilizando el valor de  $k=0,46$ , el valor de RUE obtenido está absorbiendo el posible error en  $k$ , arrojando valores de RUE más altos o más bajos para compensar por un cálculo erróneo de la radiación interceptada. En la figura V-32 se observa que el RUE calculado para nuestro cultivo (producción final/radiación interceptada acumulada) desciende a medida que se considera un  $k$  mayor. Una posible forma de obtener el valor de  $k$  en campo es midiendo la radiación sobre y bajo el dosel, junto con el valor de LAI y utilizando la ecuación de Beer:

$$R_{int}/PAR=e^{-k*LAI}$$

$$K=-\ln(R_{int}/PAR)/LAI$$

Otro método es a través del ángulo promedio de las hojas, utilizando la ecuación propuesta por Nyombi (2010), que arroja valores más altos de  $k$  a medida que el ángulo es menor (hojas más horizontales). El problema en determinar el ángulo foliar en plátano es que una misma hoja, al ser larga y curvada, puede tener varios ángulos.

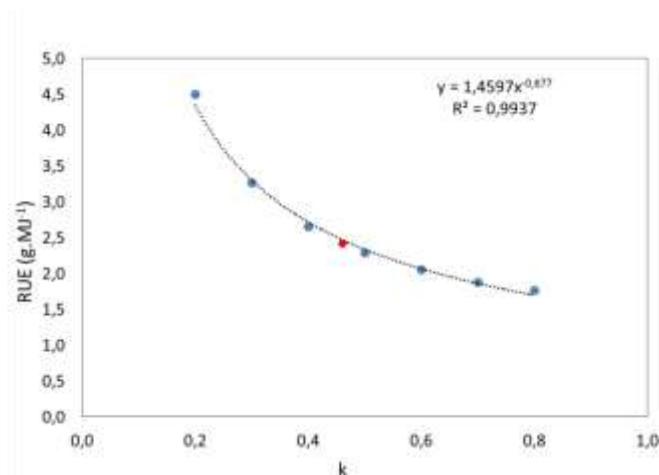


Figura V-32. Relación entre el valor del coeficiente de extinción de la luz ( $k$ ) y la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) calculada como producción total al momento de la cosecha entre radiación fotosintéticamente activa interceptada. El punto rojo representa el valor utilizado en el modelo.

Por otro lado está el tema de si  $k$  es constante a lo largo del desarrollo del cultivo o puede variar a medida que se despliega el follaje y cambia la estructura del dosel y sus propiedades espectrales. En ese sentido, se optó por un  $k$  constante y un RUE variable, pero también podríamos tener un  $k$  variable. En ese sentido Maddonni (1996) señala que generalmente los modelos no consideran diferencias en  $k$  relacionadas con las etapas de crecimiento, aunque hay evidencia experimental de que el valor de  $k$  puede variar. Ejemplos son las variaciones de  $k$  en maíz encontradas por Maddonni (1996 y 2001) entre variedades y en cultivos con diferente densidad y distribución de las hileras. Queda entonces como un aspecto pendiente profundizar el estudio de la intercepción de la radiación solar por el cultivo de plátano para poder avanzar en la modelización. Por otra parte, el RUE empleado en la mayoría de los modelos es un valor constante, que para plátano tenemos como referencia a Turner (1990), Chaves *et al.* (2009) y Nyombi (2010), quienes utilizan valores de 1,50, 1,63 y 3,5 g.MJ<sup>-1</sup> respectivamente, a diferencia del procedimiento utilizado en este modelo, que considera un RUE variable en función del crecimiento de la planta. Diversos autores coinciden en que un RUE variable según la etapa de desarrollo de la planta es una situación más realista, que permite una mejor estimación de la PPN, como refieren Kooman (1995) en papa y Salazar *et al.* (2008) en grosella. Yang *et al.* (2004) señalan que como el valor de RUE tiene en cuenta los costos respiratorios de la planta ya que se refiere a la producción neta por unidad de radiación absorbida, y siendo la respiración sensible a diferentes variables ambientales, los modelos que consideran un RUE constante serán menos sensibles a las condiciones en que se desarrolla la planta.

El RUE potencial calculado para el plátano tuvo un valor medio de  $3,06 \text{ g.MJ}^{-1}$  y un valor máximo de 6,5. Estos valores pueden parecer altos si se comparan con los calculados por Gosse *et al.* (1986), quienes indican que para plantas C3 el valor de RUE es cercano a  $2 \text{ g.MJ}^{-1}$ . Una explicación a estos valores altos de RUE pudiera ser, como se indicó anteriormente, por una subestimación de la radiación interceptada al utilizar un  $k$  demasiado bajo. También pudiera ser que las funciones de respuesta utilizadas para pasar el RUE real a RUE potencial estuvieran exagerando el nivel de déficit a que estuvo sometido el cultivo.

En relación a las funciones de respuesta, también llamadas factores de reducción e índices o coeficientes de stress, las mismas constituyen un enfoque muy utilizado en modelización para considerar el efecto de factores de control que limitan la magnitud de un proceso (Haefner, 2005). Cuando hay más de un factor limitante, como es el caso en la producción de un cultivo, las funciones de respuesta pueden actuar considerando el valor mínimo entre ellas o bien de forma multiplicativa o también se considera en algunos casos el promedio entre ellas. Al respecto no hay un consenso en la literatura. El modelo CERES-maíz (Jones y Kiniry, 1986), toma el mínimo de los diferentes factores (además de los dos incluidos por nosotros, incluye un tercero que es la temperatura), siguiendo el enfoque de Liebig que considera que el factor más limitante es el que determina la producción. El enfoque multiplicativo, por su parte, considera que hay interacciones entre los factores (Haefner, 2005). Nosotros decidimos adoptar el enfoque de la función de respuesta con el valor mínimo para cada día, ya que es aparentemente el enfoque más usual en modelización de cultivos. No incluimos la temperatura como función de respuesta en el cálculo de la producción primaria neta, ya que se consideró que en las condiciones del Sur del Lago, éstas permanecen cercanas al óptimo. Sin embargo, para la generalización del modelo quedaría pendiente incluir una función de respuesta a la temperatura.

La función de respuesta considerada para el déficit hídrico fue una función lineal que parte de un valor de 0 cuando el contenido de agua en el suelo está en el punto de marchitamiento permanente hasta un valor de 1 cuando se llega a capacidad de campo. Este es el enfoque más sencillo posible. Sin embargo, como algunos autores señalan (por ejemplo Steduto *et al.* 2009) la relación puede no ser lineal según la mayor o menor tolerancia o sensibilidad de la especie o variedad al déficit hídrico que daría respuestas convexas o cóncavas respectivamente (figura V-33).

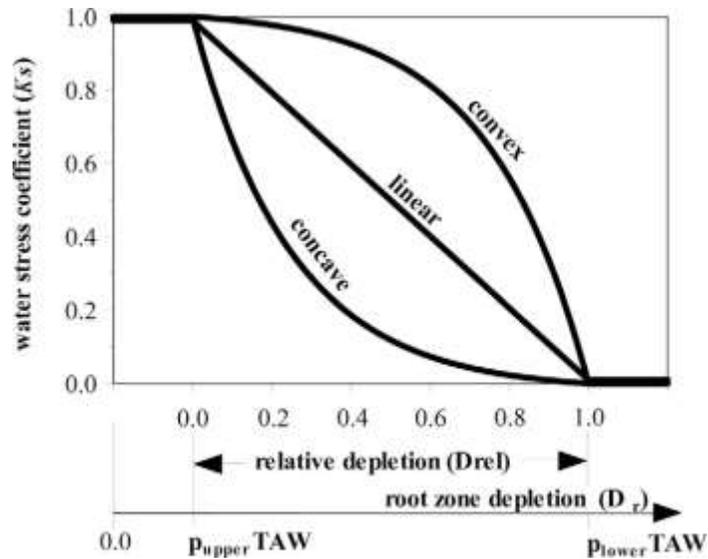


Figura V-33. Diferentes formas que puede adoptar la función de respuesta al contenido de agua en el suelo según el cultivo sea más sensible (forma cóncava) o más tolerante (forma convexa) al stress hídrico. Tomado de Steduto *et al* (2009).

La función de respuesta al nitrógeno plantea desafíos interesantes. Uno de los enfoques que utilizamos es considerar el índice de nutrición de nitrógeno, tal como también lo plantean en otros modelos como STICS (Brisson *et al.*, 1998). Sin embargo, resulta más mecánico basar la función de respuesta en la disponibilidad de nitrógeno que pueda haber en el suelo ya que la concentración en la planta de N refleja el nivel de stress a que ha estado sometida a lo largo de su desarrollo y no un nivel más instantáneo. Utilizar la concentración de nitrógeno mineral en el suelo plantea el desafío de calcular cuánto de este nitrógeno está realmente disponible para la planta considerando la sinlocación, es decir la cantidad y distribución de las raíces en relación a la distribución del nitrógeno en el suelo y la eficiencia de absorción por unidad de masa de raíz. Todos estos son aspectos que requerirán futura investigación para poder realmente formular funciones de respuesta adecuadas y realistas. La formulación de las cuales es sin duda el corazón del modelo de simulación, ya que es a través de las mismas que se considera la interacción de la planta con su ambiente.

Con respecto a la producción del cultivo, aspecto muy influenciado por las condiciones bióticas y abióticas como refieren Belalcázar (1991) y Galán y Robinson (2013) y como se indicó en el capítulo IV, las comparaciones entre localidades pueden no ser tan buenas, sin embargo, la producción potencial simulada por el modelo, podemos indicar que está en los tenores reportados de  $30 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  dado por la FAO como rendimiento óptimo para este cultivo (FAOSTAT, 2014) y con

respecto al peso del racimo el valor obtenido ( $13,5 \pm 1,6 \text{ kg.planta}^{-1}$ ) está en los rangos reportados para la región por Nava (1987) de 8,00 a 20,30  $\text{kg.racimo}^{-1}$ , Rodríguez (2003) entre 8,80 a 29,00  $\text{kg.racimo}^{-1}$  que utilizó Ávila *et al.* (2012) para predecir el rendimiento del cultivo, con respecto a este último valor estamos por debajo, que se puede considerar como potencial, debido a que es el más alto reportado en la literatura para este clon en la región y por lo tanto si tomamos este valor y la densidad de siembra considerada, la producción potencial rondaría los  $57 \text{ Mg.ha}^{-1}$ , que es 39% superior a la simulada por el modelo ( $35 \text{ Mg.ha}^{-1}$ ), por tal razón se debe investigar más sobre este agroecosistema no solo a nivel de las variables consideradas aquí, sino además considerar la caracterización morfológica y genética del clon.

### V.7.2. Submodelos de planta madre y planta hijo

La versión actual, se diferencia con respecto a la mayoría de modelos planteados en la literatura, en la forma como la planta pasa de un estado fenológico a otro, en este caso se efectúa por los coeficientes de partición de asimilados, obtenidos del comportamiento de la planta en campo, que puede presentar limitaciones para su generalización, al contrario de modelos desarrollados como el SIMBA-POP (Tixier *et al.* 2004) y LINTUL BANANA1 (Nyombi, 2010), que se basan en grados día, por lo que a nuestro modelo, se le tienen que establecer relaciones con la disponibilidad de agua y nitrógeno, que se ha observado en campo y referido en la literatura que afectan la duración del ciclo de la planta (Turner, 1994; Galán y Robinson, 2013) para que limiten no solo la acumulación de biomasa, sino que además impacten en el ciclo de desarrollo de la planta o también explorar otras opciones como las unidades térmicas de desarrollo que incluyen el fotoperíodo y el déficit hídrico para regir el desarrollo fenológico del cultivo (Fortescue *et al.*, 2011).

El cálculo de la producción de biomasa en este modelo, es similar a varios modelos presentados en la literatura (De Wit, 1986; Mariscal *et al.*, 2000; Stockle y Kemanian, 2004; Sau *et al.*, 2010), pero específicamente para banano, al utilizado en el LINTUL BANANA1 y el modelo de producción potencial de plátano de Chaves *et al.* (2009). Con este último, nos diferenciamos con respecto a los coeficientes de partición de asimilados que solo consideran el racimo, hojas,seudotallo y cormo, y en todos los modelos mencionados, dichos coeficientes, cambian en función del desarrollo fenológico de la planta regido por los grados día. Con respecto al coeficiente de partición del cormo, Chaves *et al.* (2009), lo calcularon, de igual forma como se planteó en este caso para la obtención de dicho coeficiente para la raíz.

Con respecto a los compartimentos considerados en este modelo, es importante resaltar que se están simulando todas las opciones de órganos o destinos de los asimilados fijados por la planta, que es una diferencia importante, con los modelos consultados que son generalmente para predicción de la producción potencial, por lo tanto esta producción se basa en una cantidad de asimilados que realmente no participan o que no son considerados y que puede afectar la eficiencia en el uso de la radiación y que además inmovilizan nutrientes que afectan los balances, al incorporar los factores de reducción, ya que como vimos en el capítulo III, los compartimentos de los cormos de los hijos extra y la necromasa, llegan a ser tan importantes desde el punto de vista de acumulación de asimilados y N al cormo, raíces o las hojas de la planta madre.

La dinámica del número de plantas en la unidad de producción, en el modelo LINTUL BANANA1, plantea tres niveles de división del follaje (planta madre, hijo y nieto), donde dos son sombreados por la planta madre y que afecta la intercepción de la luz de esas plantas sombreadas, en este caso, debido a la dinámica de emergencia del sistema foliar de la planta nieto del plátano, consideramos dos niveles, planta madre y el hijo, ya que el nieto generalmente al momento de la cosecha de la planta madre no presenta un área foliar funcional y se consideró como un solo compartimento. El modelo propuesto por Chaves *et al.* (2009), como es potencial, no toma en cuenta el desarrollo y crecimiento heterogéneo entre las plantas, ni factores de reducción de la producción, pero al igual que el nuestro, simula el desarrollo de una planta, la diferencia está en que nosotros incorporamos el hijo y el nieto, que en la siguiente versión, incluirá el ciclo completo del hijo que permitirá perpetuar la plantación, tal como propone Nyombi (2010), por reemplazo de las plantas tal como sucede en campo. La ventaja del enfoque de Nyombi (2010) y el nuestro, es que el cálculo de la biomasa de esta forma permite entender la producción de materia seca en el tiempo y como la misma puede ser afectada por los factores de reducción considerados, se puede simular como se afecta la producción, a diferencia del modelo SIMBA-POP, que predice la producción sin involucrar el crecimiento de la planta.

Con respecto, al flujo de retranslocación entre la planta madre y el hijo, como se observó, el mismo no se detiene por la emisión de la bellota, si se presenta una disminución de este flujo que se traduce en un menor ritmo de crecimiento (figuras III-5; III-9 y V-16), en los órganos del cormo, raíz y ligeramente en el seudotallo, pero las hojas no son afectadas, a diferencia del LINTUL BANANA1, donde asumieron que en ese momento, la retranslocación de la planta madre al hijo se suspende, así mismo, faltaría dilucidar si el flujo del hijo a la planta madre es importante incluirlo.

### V.7.3. Submodelo de balance hídrico

La humedad del suelo en este caso, a pesar de las limitaciones de información del flujo de agua en el suelo, presentó un comportamiento similar al presentado por Muñoz-Carpena *et al.* (1999) en Tenerife en banano con el modelo WAVE, donde a diferencia de nuestro caso, atribuyen los buenos resultados, a la determinación exhaustiva de los parámetros de entrada (humedad a saturación y residual, conductividad hidráulica saturada e insaturada y curvas de succión) que les permitió evaluar la buena capacidad predictiva y fiabilidad del modelo en sus condiciones. Igualmente, Ruy *et al.* (1999), para un modelo mecanicista de infiltración del agua basado en componentes de la porosidad del suelo en Guadalupe, indican que las características significativamente diferentes de los suelos influyen en la validación de este tipo de modelos, por lo que la investigación local es necesaria.

En particular en este submodelo, hay que efectuar investigación con respecto a la fluctuación del nivel freático, que no fue considerado en este trabajo, con el fin de determinar su participación en la recarga de agua del suelo, que puede en algún momento aportar para satisfacer los requerimientos del cultivo, influir sobre la dinámica de la escorrentía o su influencia en el movimiento vertical u horizontal del agua en el perfil. Así mismo, existen varios modelos que incluyen fluctuaciones del nivel freático, tales como el MODFLOW, SWAGSIM, CERES, FREAT 1, entre otros, que pueden ser un punto de partida para ser adaptados a las necesidades de la zona (Quemada *et al.*, 1999; Degioanni, *et al.*, 2006). Además, como se indicó, es un modelo general, relativamente sencillo, que puede incorporar otros aspectos como el flujo caulinar, como lo plantean Van Dijk y Bruojnzeel (2001) para maíz y yuca con buenos resultados donde incluyen la capacidad de almacenamiento de agua y evaporación del follaje y el tallo, antes, durante y después del evento de lluvia, y la concentración de la lluvia que influyen en los flujos de infiltración y escorrentía (Sansoulet *et al.*, 2008; Charlier *et al.*, 2009).

Con respecto al mulch, que fue incluido en las ecuaciones de este submodelo, pero no implementado. Una opción que se puede explorar para la próxima versión es la propuesta por Nyombi (2010), que consiste en determinar una relación entre el peso de la hojarasca y la fracción del suelo cubierta, con la ayuda de fotografías del área cubierta de hojarasca con peso conocido.

#### V.7.4. Submodelo de nitrógeno

Los resultados del Nmin, presentaron limitaciones en la simulación, sin embargo, el planteamiento general es similar al propuesto por Dorel *et al.* (2008), para banano, que consideran los flujos de lavado, mineralización de residuos y materia orgánica, la absorción por la planta y la fertilización, se diferencia que el nuestro incluye mayor cantidad de flujos y plantea un submodelo de descomposición. Los resultados de Dorel *et al.* (2008), en base al %RMSE, fueron calificados como pobres (22,98 a 24,32%) en dosis de fertilizante de 20 a 320 KgN.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y de 15,46% (Regular) para una dosis de 400 KgN.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. Suponemos que la falta de calibración del Nmin, en este caso, fue debido al planteamiento metodológico para el muestreo de campo como se presentó en el capítulo II, ya que se obtuvo un valor promedio de Nmin del área que cubre una planta y dada la forma de aplicación del fertilizante, debe formarse un gradiente desde la banda de fertilización y se consideró la biomasa de raíces uniforme en toda el área de cada capa, diferente a lo observado en la figura III-4, como plantean Bleken *et al.* (2009) para la evaluación del Nmin del suelo, donde indican que los problemas de muestreo de campo, influyeron en la calibración de su experimento. Además de la baja frecuencia de muestreo, es otro aspecto a considerar, como menciona Sharp *et al.* (2011). Estos problemas detectados requieren de investigaciones posteriores para su calibración. Sin embargo, dadas las limitaciones detectadas, los resultados obtenidos presentan tendencias similares entre los valores observados y simulados, en investigaciones puntuales para estos flujos a obtenidos por Muñoz-Carpena *et al.* (1999), con el modelo WAVE, las tendencias de los valores de nitratos y amonio en varios períodos durante el ciclo del cultivo de banano en Tenerife, fueron opuestos, proponiendo continuar con las investigaciones en el área.

Los resultados obtenidos para el nitrógeno en la biomasa de la planta madre y el hijo, nos indican que se debe continuar la investigación, para mejorar otros índices explorados en este trabajo como el INN y como ya se indicó la calibración del compartimiento de la raíz y el Nmin del suelo, para mejorar la simulación. En este particular, Bleken *et al.* (2009), en maíz simularon la concentración de N en la planta por el concepto de concentración crítica de Greenwood, similar al enfoque planteado por Dorel *et al.* (2008), que asumen la absorción de N en función de la producción de materia seca, la concentración de N, calculada con la curva de dilución crítica para plantas C3, propuesta por Greenwood *et al.* (1990), y la demanda, la absorción del cultivo se determina con el valor mínimo entre la demanda y el Nmin del suelo, igual como se planteó en este trabajo, pero aquí, se quiere mantener la variable de la raíz, ya que permite incorporar

efectos ambientales y plagas que influyen en el comportamiento general de la planta. En este sentido, Brisson *et al.* (1998b), indican que la raíz es un compartimiento importante en STICS ya que intervienen en la absorción de agua y minerales y Bleken *et al.* (2009), indican que la simulación de la biomasa de la raíz y su contenido de nitrógeno es importante para la correcta simulación de la materia orgánica y la dinámica del Nmin del suelo y el lavado de nitratos, aspectos que se requieren mejorar en este agroecosistema.

El lavado de N se determinó de igual forma como indican Sharp *et al.* (2011) para el modelo APSIM en la determinación del balance de N, que debido a la sub y sobre predicción de los valores, concluyen que se necesitan más pruebas. La diferencia con nuestro cálculo es debido a que no disponemos de la concentración de N en el agua de drenaje y asumimos la concentración de N de la capa 2 como fue explicado, aspecto a evaluar y mejorar ya que no existen datos localmente para comparar que tan precisa es la estimación como se discutió en el capítulo IV.

Adicionalmente, se pueden explorar otros enfoques para este cálculo, como muestra Sau *et al.* (2010), en el modelo CERES-Maize, que trabajan con concentraciones críticas y mínimas de N y la absorción en función de la capacidad potencial del perfil para suministrar N, considerando varias variables como la densidad de raíces, concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , humedad del suelo entre otras, diferente al método empleado en este trabajo, donde se consideró la demanda del cultivo y la absorción máxima, en función de la concentración de N obtenida en campo, la producción de materia seca total por planta, el compartimiento de las raíces y el Nmin del suelo.

Dada la dificultad de obtener información de las variaciones de las concentraciones de N en los diferentes flujos del modelo, a lo largo de un período de tiempo, es necesario que estás concentraciones, no sean datos de entrada y que su simulación se realice de forma mecanicista, para que el modelo no dependa de ellas para correr, en este sentido, una posible opción es la utilización de redes neuronales artificiales que son útiles en aquellas situaciones complejas donde se desconocen las relaciones entre las variables de entrada y salida o debido, a que por los métodos matemáticos comunes no logran obtenerse, ya que estás redes han dado resultados satisfactorios para la predicción del rendimiento del plátano (Ávila *et al.*, 2012; Kouame *et al.*, 2013).

#### **V.7.5. Submodelo de descomposición**

Los cultivos de bananos y plátanos producen gran cantidad de residuos que a su vez producen altas cantidades de materia orgánica residual, que es incorporada al compartimiento de la materia orgánica de suelo (Dorel *et al.*, 2008), sin embargo, los resultados obtenidos en los

suelos de este estudio pareciera no ocurrir así, además existen diferentes tipos de materiales que quedan arriba y abajo del suelo con diferentes velocidades de descomposición y que en total representan el 82% del N absorbido por la planta, donde el destino de este N es muy poco conocido (Thieuleux, 2006), de allí la importancia de que este submodelo sea calibrado, ya que como indican Dorel *et al.* (2008), las simulaciones realizadas en plantaciones de banano en diferentes lugares, con la misma dosis de N y frecuencia de aplicación, resaltaron las diferencias de clima y suelo, que resultan en altas diferencias en la disponibilidad de N para la producción y que esta variación, puede estar relacionada con el suministro de N a través de la mineralización de la materia orgánica del suelo y como indica Felicien (2009), estos procesos son influenciados por factores edáficos y relaciones C/N de los residuos, que deben ser evaluados en cada tipo de suelo, para que la modelización sea adecuada a cada condición.

El modelo planteado en este estudio reproduce en términos generales la tendencia del crecimiento de la planta de plátano bajo las condiciones experimentales y en menor medida los demás submodelos y en vista a los antecedentes consultados favorables y desfavorables en la simulación de este tipo de sistemas, estamos satisfechos dadas las limitaciones de información, representando un paso importante para la evaluación y planificación del agroecosistema plátano, cultivado en el sur del lago de Maracaibo, sin embargo, requiere continuar con las investigaciones para la incorporación de parámetros necesarios para su generalización y continuar los procesos de prueba y validación, que no pudieron ser alcanzados en este trabajo, por la complejidad del sistema y recursos económicos.

## CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### VI.1. Conclusiones

El planteamiento de la tesis de realizar un análisis agroecosistémico, fue acertado, ya que bajo este enfoque, dadas las limitaciones de información en la región, fue posible estructurar una ruta metodológica que guió el proceso de selección de herramientas ecológicas necesarias para conocer la dinámica de crecimiento y acumulación de biomasa, el balance hídrico y el ciclado de nitrógeno, interpretar los resultados y la obtención de conocimientos que permitieron mejorar la comprensión del funcionamiento del agroecosistema del cultivo de plátano en el sur del Lago de Maracaibo, bajo las condiciones de estudio y plasmarlo en un modelo de simulación.

Siguiendo el orden de los objetivos planteados en el capítulo I, las principales conclusiones de este trabajo son:

#### Objetivo 1

○ La dinámica del crecimiento del cultivo de plátano, siguió el patrón de las tres etapas de crecimiento propuestas por Simmonds, (1973), Belalcázar, (1991) y Sancho, (1996), identificadas como: 1. Etapa de crecimiento vegetativo; 2. Etapa reproductiva; 3. Etapa productiva. A continuación se presentan aportes adicionales a los referidos en la literatura:

- En la etapa de crecimiento vegetativo, se presentan dos fases una llamada establecimiento, donde el cormo presenta alta relación C/N que indica su función de almacenamiento, disminuye su biomasa, para la formación de las nuevas estructuras aéreas y subterráneas, vuelve a aumentar con la formación del segundo cormo que marca el fin de esta fase, adicionalmente, se determinó que las tasas de crecimiento y de absorción de nitrógeno experimentan un aumento gradual. En la fase de crecimiento vegetativo, la planta continua su crecimiento, pero de forma exponencial, que le permite incrementar su fitomasa 16 veces en 90 días y al finalizar esta fase alcanza el valor de uno en la relación BA/FS, que indica el equilibrio entre las estructuras aéreas y subterráneas, así mismo, las tasas de crecimiento absoluto y absorción de nitrógeno, llegan a sus valores máximos y la relación C/N de la planta madre disminuye a la mitad con respecto a la relación inicial al momento de la siembra.
- La etapa reproductiva, presentan dos procesos simultáneos, uno es el inicio de la formación y desarrollo de la inflorescencia dentro delseudotallo y el otro es la continuación del crecimiento exponencial, con una tasa de crecimiento absoluto y absorción de nitrógeno similar a la fase anterior, con los máximos valores de biomasa en los órganos aéreos y fitomasa de los subterráneos, igualmente, se alcanzan los valores máximos de acumulación de nitrógeno

en los órganos de absorción y asimilación, hacia el final de la etapa, estos valores se ven reflejados con el aumento de las relaciones de BA/FS y C/N, producto de la importancia que adquiere la biomasa aérea, por la función de almacenamiento del seudotallo y la planta alcanza el valor máximo del índice de área foliar, lo que indica la preparación de la planta para la fase productiva. Con respecto a la planta hijo, debido a la pérdida de dominancia apical de la madre, se observa un crecimiento exponencial de su biomasa y acumulación de nitrógeno de todos sus órganos incluyendo el nieto.

- La etapa productiva, se inicia con la emergencia de la bellota y se caracteriza por valores bajos en las tasas de crecimiento absoluto y de acumulación de nitrógeno, debido a la senescencia de la planta, así mismo, la relación BA/FS, indica que el crecimiento es menor con alto predominio de la parte aérea representada en un 36% por el racimo. La retranslocación de asimilados para el llenado del racimo, se evidencia en la disminución en biomasa que experimentan los órganos desde el inicio de esta etapa, donde resalta el seudotallo que disminuye casi un 50%, por lo que su contribución es importante para el llenado del racimo, hecho muy poco mencionado en la literatura, donde, la tasa de retranslocación de asimilados, es el flujo más importante para el llenado del racimo que representa el 60% de la materia seca del mismo y el 30% de la biomasa total de la planta, que se tradujo en el aumento de la relación C/N al momento de la cosecha. La planta hijo en esta etapa, presenta una disminución en la velocidad de crecimiento, posiblemente ocasionada por la emergencia del racimo. Con respecto a la relación BA/FS, indica que el hijo está alcanzando la independencia de la planta madre, con el equilibrio entre las estructuras aéreas y subterráneas, lo que muestra su proximidad a la diferenciación floral, comparado con el comportamiento observado en la planta madre en esa variable.
- El sistema radicular se caracterizó, por una distribución más horizontal que vertical, con raíces orientadas radialmente, poco profundas y cuya abundancia disminuye horizontalmente al alejarse del cormo. Se puede resaltar que el mayor desarrollo radicular se encontró entre la diferenciación floral y la emergencia de la bellota. La planta efectúa una exploración adecuada de la primera capa del suelo, por la presencia de mayor densidad de raíces, desde el final de la etapa de crecimiento vegetativo y no tan buena en la segunda capa, con mayor volumen de suelo y menor densidad raíces en comparación a la capa uno.
- La dinámica de la concentración de N en los diferentes órganos de la planta se presentó de la forma siguiente, la concentración de N en la hoja, fue la más alta entre todos los órganos de la

planta, permaneció constante durante la primera etapa y disminuyó en la cosecha. Con respecto alseudotallo, comienza con un valor alto, producto de su capacidad de realizar fotosíntesis y disminuye hasta la cosecha, disminuyendo más del 50 % de su valor inicial. La concentración de N del cormo, se incrementa paulatinamente hasta la diferenciación floral y permanece casi constante hasta la cosecha, en las raíces de la unidad de producción, no se presentaron cambios a lo largo del ciclo de crecimiento. El racimo inicia al emerger la bellota con un valor alto y disminuye hasta un 75 % al momento de la cosecha.

- La dinámica del N, en la planta está asociada a la acumulación de materia seca, con una baja acumulación durante la etapa de crecimiento vegetativo, se incrementa hasta alcanzar el máximo durante la emergencia de la bellota, mantenerse casi constante en los primeros días de llenado del racimo y disminuir hasta la cosecha. Los órganos de la planta luego de alcanzar sus máximos de acumulación de N, presentan una tendencia a disminuir hasta el momento de la cosecha, a excepción del racimo y la necromasa que aumenta. Esta dinámica de absorción de nitrógeno, nos indica que la planta acumula en la etapa de crecimiento vegetativo, aproximadamente el 50% del N y en la etapa reproductiva el restante 50% y se concentra en tres meses del total del ciclo del cultivo.

- La curva de dilución, obtenida para el cultivo de plátano, presenta características diferentes a la curva de dilución típica, la cual resultó en una curva dividida en dos partes, una primera parte, durante la cual aumenta levemente el contenido de N en la planta y una segunda parte, en la que disminuye y sigue la curva propuesta por Greenwood.

- El INN de la planta madre, durante la fase de establecimiento hasta la hoja 3, estuvo por debajo del óptimo, permaneció alrededor del óptimo durante el resto de las etapas de crecimiento hasta la cosecha. La planta hijo por el contrario presentó un INN alto hasta el momento de la emergencia delseudotallo y permaneció en el óptimo hasta la cosecha de la madre, donde presentó un valor menor, mostrando el comportamiento diferencial del índice durante los períodos de siembra del cormo madre y desarrollo del cormo del hijo.

## **Objetivo 2**

- Con respecto a los flujos del balance hídrico del agroecosistema, podemos resaltar: el flujo de goteo+caída directa, presenta el mayor porcentaje con respecto al flujo caulinar y es afectado de forma inversa por el crecimiento foliar de la planta. La intercepción presentó valores pequeños porcentualmente con respecto a la precipitación, sin embargo, en valor absoluto, muestra la alta

capacidad del follaje de esta planta para retener agua. El flujo caulinar, es una parte pequeña de la precipitación neta, que alcanzó sus valores máximos en IAF altos, al contrario que el flujo goteo+caída directa.

- El principal flujo de salida obtenido en el agroecosistema plátano fue la escorrentía, con el 52% de la precipitación total bajo nuestras condiciones y el flujo goteo+caída directa, influyó en el patrón de distribución de la lluvia sobre el suelo, que se concentra alrededor de los 0,37 m desde el pseudotallo, por lo que fue el principal precursor de la escorrentía. Es importante resaltar que la cantidad de agua que infiltra en el suelo, es menos de la mitad de la que entra por precipitación.
- El balance hídrico del agroecosistema presentó en general un comportamiento estable, sin diferencias relevantes durante las diferentes etapas de desarrollo de la planta. Con respecto a los flujos de salida, se puede indicar que siguieron una secuencia de importancia de mayor a menor como sigue: escorrentía > evapotranspiración > drenaje > intercepción
- Es importante resaltar que de mantenerse el comportamiento de las salidas de agua y la baja infiltración bajo condiciones edafoclimáticas similares a las de este estudio en el sur del Lago de Maracaibo, se estima que el cultivo puede pasar por períodos de déficit hídrico cuando los eventos de precipitación presentan baja frecuencia.

www.bdigital.ula.ve

### **Objetivo 3**

- En general, las concentraciones de nitrógeno en los flujos de precipitación, flujo de goteo+caída directa y el flujo caulinar, están en el rango reportado para varios ecosistemas naturales y agrícolas. La concentración de las formas de N, en estos flujos, presentó predominio del amonio sobre el nitrato.
- En la escorrentía, fue mayor la concentración de nitrato con respecto al amonio, como era de esperarse, sin embargo, es importante resaltar que la alta escorrentía obtenida, no se correspondió a un valor alto de pérdida de N, a pesar de la forma superficial de aplicación del fertilizante.
- La concentración y pérdidas de N en el drenaje, estimadas con el modelo y al compararlas con la literatura, no son bajas. Sin embargo, se ubica como la principal salida del elemento del sistema y por encima de los niveles reportados para aguas de consumo humano.
- La dinámica obtenida en la unidad de producción del cultivo de plátano, nos muestra que almacena alta cantidad de nitrógeno, pero producto del proceso de manejo agronómico y la cosecha de la fruta, una parte importante del nitrógeno absorbido retorna paulatinamente al

suelo en forma de necromasa aérea, que es menos propensa a perderse y puede contribuir a suplir requerimientos del siguiente ciclo de producción.

- La volatilización de urea en el agroecosistema plátano, aplicada superficialmente, resulto una salida de nitrógeno relativamente alta, que ocurre rápidamente cuando existen condiciones ambientales adecuadas y representó la segunda mayor pérdida.
- La pérdida de sedimento en este agroecosistema puede considerarse moderada, asociada a los eventos de precipitación mayores de 10 mm. La pérdida de nitrógeno en los sedimentos, está relacionada con las cantidades de sedimentos, ya que la concentración de nitrógeno permaneció casi constante durante el ciclo del cultivo.
- Los balances realizados por etapas de desarrollo, mostraron que, durante la etapa de crecimiento vegetativo, se aplicó un exceso de fertilizante y durante la etapa reproductiva, la fertilización no cubrió los requerimientos de la planta por lo que se considera una debilidad en la sincronización de la fertilización con el crecimiento de la planta. En la etapa reproductiva, la absorción es muy baja, por lo que no es necesario aplicar fertilizante.
- El balance de nitrógeno del ciclo productivo, presentó valores negativos en los compartimientos del suelo y el N<sub>min</sub> del suelo, que se traducen en pérdida de materia orgánica, afectando la sustentabilidad del sistema con respecto a este elemento.
- La dinámica del N, define un agroecosistema con baja eficiencia del uso del fertilizante y un potencial alto de pérdidas, favorecido por las condiciones climáticas que provocan un acelerado proceso de descomposición y la baja acumulación de materia orgánica en el suelo, por lo tanto, las dosis de fertilizante deben mantenerse altas en el tiempo y en base a las estimaciones realizadas, el aporte potencial de N, a los efluentes del Lago de Maracaibo es elevado y por lo tanto contaminante, considerando el área cultivada en la zona.
- El balance de nitrógeno del agroecosistema, nos indica que fue positivo ya que aumentó el N levemente, principalmente por el N acumulado en la biomasa del hijo.
- El agroecosistema plátano, es altamente vulnerable, al cambio climático, dada la cantidad de agua infiltrada y la escorrentía obtenida, ya que los escenarios planteados por Martelo (2004) y Jarvis *et al.* (2008), para el país, indican que se espera la disminución de la precipitación, el aumento de la temperatura, así como, la frecuencia de lluvias intensas y de corta duración, que pueden provocar condiciones de sequía frecuentes, que debido los requerimientos del cultivo, incidirán en los niveles de producción y calidad de la fruta.

#### **Objetivo 4**

- El modelo puede fomentar nuevas investigaciones en el cultivo, debido a la deficiencia de información con respecto a los temas principales de la tesis en el sur del lago de Maracaibo, que permitan convertirlo en un sistema de soporte en la toma de decisiones a nivel de las parcelas de productores e instituciones públicas o privadas.
- En esta tesis, se han dado los primeros pasos hacia el desarrollo de un modelo de simulación del agroecosistema plátano en el sur del lago de Maracaibo. También se ha indicado los pasos que se deben tomar para ampliar las capacidades de este modelo, y su utilidad como herramienta para la investigación y manejo del cultivo. Esperamos que en el futuro cercano, el modelo participe en la realización investigaciones tendientes a alcanzar el potencial del plátano en esta zona, con el fin de contribuir a la seguridad alimentaria del país.

En general, el trabajo aportó una gran cantidad de información, sobre el funcionamiento del agroecosistema plátano, que no existía para la zona, donde se observó cómo los flujos del balance hídrico canalizan el agua favoreciendo un alto porcentaje de salida e igualmente con el movimiento del nitrógeno, se determinó que la principal vía de pérdida de nitrógeno no es necesariamente la escorrentía, como era de esperarse y la necromasa de la planta se constituye en un compartimiento importante de acumulación de N en el sistema. Además, incluyó otras variables que no se habían considerado para la evaluación de este cultivo, como por ejemplo la relación C/N, que aportó criterios para la diferenciación de las etapas y cambios en la función de los órganos de la planta, la importancia del flujo de retranslocación para el llenado del racimo, así como las curvas de crecimiento y absorción de N y se logró plasmar gran parte de la información obtenida en un modelo de simulación, sin embargo, falta todavía mucho trabajo por hacer.

## VI.2. Recomendaciones

Esta tesis ha permitido determinar limitaciones y visualizar líneas de investigación que se traducen en recomendaciones, al efecto de un mejor conocimiento de las particularidades del agroecosistema del plátano en el Sur del Lago de Maracaibo, bajo el enfoque agroecosistémico, para contribuir a un manejo que favorezca la sustentabilidad.

- Continuar la evaluación del patrón de asignación de la biomasa de la planta hijo después de la cosecha de la planta madre y cómo influye el déficit de nutrientes o de agua en el patrón de acumulación de biomasa.
- Efectuar evaluaciones con nitrógeno marcado para determinar entre otros aspectos la eficiencia del uso de fertilizante y flujos entre la madre y el hijo.
- Medir las características de los suelos, con el fin de seleccionar metodologías para la determinación de los flujos subsuperficiales. Con respecto a la humedad del suelo, aumentar la frecuencia de toma de datos e incluir diferentes épocas y capas de suelo.
- Incluir en las evaluaciones los procesos nitrificación, desnitrificación y la volatilización en otras condiciones climáticas.
- Ahondar en el análisis espacial de los procesos una vez que se ha demostrado la heterogeneidad en la distribución de la precipitación neta, de las raíces y del fertilizante, este aspecto se constituye en un rasgo conspicuo del funcionamiento agroecosistémico que amerita mayor investigación para su inclusión en el modelo de simulación.
- Se requieren seguir, con la evaluación del potencial de la precipitación para provocar escorrentía, fragmentación del suelo, además, del flujo de drenaje y la erosión, así mismo, experimentar con prácticas agroecológicas que pueden contribuir al aumento de la materia orgánica del suelo, determinar sus impactos sobre el balance de nutrientes, la capacidad de infiltración y retención de agua para disminuir la escorrentía, sin olvidar la nutrición del cultivo.
- Para tener una visión más regional del flujo de escorrentía es importante la obtención de información similar en otros tipos de suelo de la zona y otros sistemas de manejo (pastizales, cultivos perennes, anuales o con manejos intensivos del suelo).
- Las metodologías probadas aquí, a excepción del lisímetro, pueden ser fácilmente adaptadas a otras plantas y condiciones ambientes similares.

### VI.2.1. Recomendaciones para el manejo del cultivo

- Se requiere la evaluación de la intercepción de la radiación y el LAI bajo diferentes densidades de siembra para maximizar el aprovechamiento de la luz en favor de la producción en los sistemas de cultivo de plátano.
- Mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno por medio de la sincronización y sinlocación, que se desprende de la dinámica de absorción de nitrógeno observada, se tendría que efectuar una reprogramación de la frecuencia de aplicación de fertilizantes y su distribución sobre el suelo, para que siga la curva de absorción y ajuste de la dosis de N en la etapa de crecimiento.
- Profundizar en la evaluación del status hídrico, con fines de reducir la escorrentía y aumento de la capacidad de campo.
- Determinar las funciones que cumplen los hijos extra en la unidad de producción con el objeto de buscar alternativas más eficientes de deshije con el fin de disminuir el tamaño del compartimiento, para disminuir el gasto de asimilados en el crecimiento y mantenimiento de estas estructuras.

Todos los aspectos mencionados pasan por la incorporación en los trabajos de investigación de los siguientes temas:

- Cultivos asociados o policultivos: estas asociaciones, se pueden considerar las leguminosas, sean perennes o anuales, que permitan reducir las entradas de N por fertilización o aumentar la capacidad del agroecosistema para retener nitrógeno y cuyos residuos sean de descomposición más lenta que el plátano.
- Utilización de fuentes orgánicas de nitrógeno que permitan ir aumentando el nivel de materia orgánica del suelo. Se debe evaluar la incorporación de abonos verdes y retomar las experiencias en la evaluación de abonos orgánicos (compost y lombricultura), realizados en la Estación Local Chama, biofertilizantes (Kuttimani *et al.*, 2013), con un enfoque ecológico y agronómico (Baiyeri *et al.*, 2013). Otro enfoque interesante, es lograr la sincronización entre la demanda del cultivo y la disponibilidad espacial y temporal a través de combinaciones de abonos y fertilizantes de diferente calidad, que permitiría reducir las pérdidas de N, al mantener un tamaño mínimo del compartimiento para satisfacer las necesidades de la planta (Dobermann y Cassman, 2004; Machado, 2005).

## REFERENCIAS

- Ablan, M. 2009. Algoritmo para calcular los eventos de precipitación del registro de una estación meteorológica. No publicado.
- Abreu, E., Gutiérrez, A., Quintero, M., Molina, L., Anido, J., Ablan, E., Cartay, R. y Mercado, C. 2007. El cultivo del plátano en Venezuela: Desde el campo hasta la mesa. Fundación Polar y CIAAL-ULA. Mérida –Venezuela.
- Acevedo, D. y Sarmiento, G. 1990. Intercepción de la lluvia, escorrentía superficial y drenaje profundo en una pastura tropical y un cultivo de maíz en Barinas Venezuela. *Ecotrópicos*. 3(1): 12-32.
- Acón-Ho, J., Cervantes-Umaña, C. y WingChing-Jones, R. 2013. Recuperación del  $^{15}\text{N}$  en la planta de banano y en el suelo de áreas con origen sedimentario. *Agronomía mesoamericana*. 24 (1): 71-81.
- Akinro, A., Olufayo, A. y Oguntunde, P. 2012. Crop water productivity of plantain (*Musa* sp) in a humid tropical environment. *Journal of engineering science and technology review* 5(1): 19-25.
- Altieri, M. 1999. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. Ed. Nordan-Comunidad. Montevideo, Uruguay. 325 p.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje 56. FAO. Roma.
- Alvin, P. 1952. Apuntes de fisiología vegetal. Instituto Interamericano de ciencias agrícolas. Turrialba, Costa Rica. 118p.
- Andrade, G., Da Silva, H., Ferreira, C., Bellote, A. y Moro, L. 1995. Contribución del agua de lluvia en la oferta de nutrientes minerales para *Eucalyptus grandis*. *Bosque* 16(1): 47-51.
- AOAC, 1990. Nitrogen (Total) (Crude Protein) in plants. Kjeldahl methods. En: K. Helrich (Ed.). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Publicado por AOAC Inc. 15 edición. Volumen I, p. 59.
- Arauzo, M., Díez, J. y Hernáiz, P. 2003. Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. Estudios de la zona no saturada del suelo. Ed. Álvarez-Benedi y Marinero, P. VI: 39-44.
- Araya, M. y Blanco, F. 2001. Changes in the stratification and spatial distribution of the Banana (*Musa* AAA cv. Gran Naine) root system of poor, regular, and good developed plants. *Journal of plant nutrition* 24(11): 1679-1693.
- Aristizábal, M. 2008. Evaluación del crecimiento y desarrollo foliar del plátano hondureño enano (*Musa* AAB) en una región cafetera de Colombia. *Agronomía*. 16(2): 23-30.
- Aristizábal, M. y Jaramillo, C. 2010. Identificación y descripción de las etapas de crecimiento del plátano (*Musa* AAB). *Agron*. 18(1): 29-40.
- Ataroff, M. y Sánchez, L. 2000. Precipitación, intercepción y escorrentía en cuatro ambientes de la cuenca media del río El Valle, estado Táchira, Venezuela. *Rev. Geog. Venez.* 41(1): 11-30.
- Ávila, R., Rodríguez, V. y Hernández, E. 2012. Predicción del rendimiento de un cultivo de plátano mediante redes neuronales artificiales de regresión generalizada. *Publicaciones en ciencias y tecnología*, 6(1): 31-40.

- Baiyeri, K., Ndukwe, O. y Tenkouano, A. 2013. Manure placement method influenced growth, phenology and bunch yield of three *Musa* genotypes in a humid zone of Southern Nigeria. *Communications in biometry and crop science*. 8(1): 1-9.
- Balasubramaian, V., Alves, B., Aulakh, M., Bekunda, M., Cai, Z., Drinkwater, L., Mugendi, D., Kessel, C. y Oenema, O. 2004. Crop, environmental and management factors affecting nitrogen use efficiency. En: *Agriculture and the nitrogen cycle*. Mosier, A., Syers, J. y Freney, J. (eds). Scope 65. Island Press. p. 19-33.
- Barbieri, P. y Echeverría, H. 2003. Evolución de las pérdidas de amoníaco desde urea aplicada en otoño y primavera a una pastura de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*). *RIA*, 32(1):17-29.
- Bassette, C. y Bussiere, F. 2008. Partitioning of splash and storage during raindrop impacts on banana leaves. *Agricultural and forest meteorology*. 148: 991-1004.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D. y Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38: 139-164.
- Belalcázar, A., Rosales, F. y Pocasangre, L. 2005. Development and formation of plantain roots (*Musa* AAB Simmonds). En: *Banana root system: towards a better understanding for its productive management*. Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003, Turner, D. y Rosales, F. (eds.), INIBAP, France, and MUSALAC and CORBANA, Costa Rica. p. 75-82.
- Belalcázar, S. 1991. El cultivo del plátano en el trópico. Manual de asistencia técnica # 50. Bogotá. INIBAP/ CIID/ICA/Feder. Nac. de Cafeteros de Colombia. 376 p.
- Belalcázar, S., Espinoza, J., Cayón, G., Valencia, G., Morales, H. 1999. Dinámica de elementos nutritivos en el clon de plátano Dominico Hartón (*Musa* AAB Simmonds). En: *Curso de Nutrición y Fertilización del plátano*. INPOFOS-UCLA-CIPLAT-SUVICA. Pp 77-86.
- Bezerra, R., Tavares, F. y Raj, H. 2010. Acúmulo de matéria seca, absorcao e exportacao de micronutrientes em variedades de bananeira sob irrigacao. *Cienc. Agrotec., Lavras*. 34(3): 536-544.
- Bleken, M., Herrmann, A., Haugen, L., Taube, F. y Bakken, L. 2009. SPN: a model for the study of soil-plant nitrogen fluxes in silage maize cultivation. *European journal of agronomy*, 30: 283-295.
- Blomme, G., Draye, X., Ruyfukiri, G., Declerck, S., De Waele, D., Tenkouano, A. y Swennen, R. 2000. Progress in understanding the roost of *Musa* spp. En: *INIBAP annual report 1999*. INIBAP. Montpellier-Francia. P. 14-19.
- Blomme, G., Swennen, R. y Tenkouano, A. 2005a. Environmental influences on shoot and root growth in banana and plantain. *African Crop Science Conference Proceedings*. 7: 1163-1167.
- Blomme, G., Swennen, R., Soka, G., Turyagyenda, F. y Tenkouano, A. 2008. Relationship between root and shoot growth traits during the plant crop and first ratoon in banana and plantain (*Musa* spp.) y its implications for perennial cultivation on degraded Ultisols in south-eastern Nigeria. *Journal of Applied Biosciences*. 8(2): 309-322.
- Blomme, G., Teugels, K., Blanckaert, I., Sebuwufu, G., Swennen, R. y Tenkouano, A. 2005b. Methodologies for root system assessment in bananas and plantains (*Musa* spp.) En: *Banana root system: towards a better understanding for its productive management*. Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003, Turner, D.W. and Rosales, F.E. (eds.), INIBAP, France, and MUSALAC and CORBANA, Costa Rica. p. 43-57.

- Boaretto, A., Muraoka, T. y Trevelin, P. 2008. Uso eficiente del nitrógeno de los fertilizantes convencionales. *Informaciones agronómicas*. IPNI. 68: 13-14.
- Bolado, S., Alonso, A., y Álvarez, J. 2003. Características de procesos acoplados de absorción, transformación y volatilización de nitrógeno en suelos fertilizados con urea. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*. Vol. VI: 185- 192.
- Bonhomme, R. 1993. The solar radiation: characterization and distribution in the canopy. En: Varlet-Grancher, C. et al (eds). *Crop structure and light microclimate; characterization and applications*. INRA (Francia). pp. 17-28.
- Bouyoucos G., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron. J.* 54: 464-465.
- Bradstreet R., 1965. The Kjeldahl method for organic nitrogen. Academic Press Inc. New York, 239 p.
- Bremner J., Mulvaney C., 1982. Nitrogen-total. En: Page, A., Miller, R., Keeney, D. (Eds.). *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd Edition, Agronomy. 9: 595-624.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, P., Cellier, P., Machet, J., Meynard, J. y Delécolle, R. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomy* 18(5-6): 311-346.
- Brisson, N., Ozier-Lafontaine, H. y Dorel, M. 1998b. Effects of soil management and water regime on Banana growth between planting and flowering, simulation using the stics model. *Acta Horticulture*, 490: 229-238.
- Bruulsema, T., Witt, C., García, F., Li, S., Rao, T., Chen, F. y Ivanova, S. 2008. Marco global de las mejores prácticas de manejo (MPM) de los fertilizantes. *Informaciones Agronómicas*. 70: 1-4.
- Calberto, G., Staver, C. y Siles, P. 2015. An assessment of global banana production and suitability under climate change scenarios. En: *Climate change and food systems: global assessments and implications for food security and trade*, Aziz Elbehri (editor). Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. p. 265-291.
- Calvo, M. 2003. Evalúan siembra anual de plátano bajo altas densidades (en línea). Ministerio de agricultura y ganadería Costa Rica. Consultado 20 diciembre 2007. Disponible en <http://www.infoagro.go.cr/Noticias/cp-set07.htm>.
- Calvo-Alvarado, J., Jiménez-Rodríguez, C. y Saá-Quintana, M. 2012. Intercepción de precipitación en tres estadios de sucesión de un Bosque húmedo tropical, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 9(22). 2215-2504.
- Candelaria, B., Ruiz, O., Gallardo, F., Pérez, P., Martínez, A. y Vargas, L. 2011. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14: 999-1010.
- Carr, M. 2009. The water relations and irrigation requirements of banana (*Musa spp.*). 2009. *Experimental agriculture* 45(3): 333-371.
- Carran de, G., Angeloni, P. y Prause, J. 2007. Determinación de la curva de dilución de nitrógeno en diferentes fases fenológicas del girasol. *Agricultura técnica (Chile)* 67(2): 189-195.

- Castillo, AM., Hernández, JA., Avitia, E., Pineda, J. Valdez, LA., Corona, T. 2011. Extracción de macronutrientes en banano "Dominico" (*Musa* spp.). Revista internacional de botánica experimental (PHYTON). 80: 65-72.
- Cattan, F., Bussiere, F. y Nouvellon, A. 2007a. Evidence of large rainfall partitioning patterns by banana and impact on surface runoff generation. *Hydrol. Process.* 21: 2196-2205.
- Cattan, P., Cabidoche, Y-M., Lacas, J-G y Voltz, M. 2006. Effects of tillage and mulching on runoff under banana (*Musa* spp.) on a tropical Andosol. *Soil & Tillage Research* 86: 38-51.
- Cattan, P., Ruy, S., Cabidiche, Y., Findeling, A., Desbois, P. y Charlier, J. 2009. Effect on runoff of rainfall redistribution by the impluvium-shaped canopy of banana cultivated on an Andosol with a high infiltration rate. *J. Hydrol.* 368: 251-261.
- Cattan, P., Voltz, M., Cabidoche, M., Lacas, J. y Sansoulet, J. 2007b. Spatial and temporal variations in percolation fluxes in a tropical Andosol influenced by banana cropping patterns. *Journal of Hydrology* 335: 157-169.
- Cavalcante, A., Sampaio, E. y Cavalcante, U. 2005. Interdependencia na absorcao e redistribuicao de fósforo entre plante mae e filha de bananeira. *Rev. Braz. Frutic.* 27(2): 255-259.
- Cayón, D. 2004. Ecosiología y productividad del plátano (*Musa* AAB Simmonds). XVI Reunión Internacional ACORBAT. Publicación especial. Pp. 172-183.
- Ciampitti, I., Ciarlo, E. y Conti, M. 2005. Emisiones de óxido nitroso en un cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]: efecto de la inoculación y de la fertilización nitrogenada. *Cienc. Suelo* 23(2): 123-131.
- Cichota, R., Brown, H., Snow, V., Wheeler, D., Hedderley, D., Zyskowski, R. y Thomas, S. 2010. A nitrogen balance model for environmental accountability in cropping systems. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science.* 38(3): 189-207.
- Charlier, J., Moussa, R., Cattan, P., Cabidoche, Y. y Voltz, M. 2009. Modelling runoff at the plot scale taking into account rainfall partitioning by vegetation: application to stemflow of banana (*Musa* spp.) plant. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13: 2151-2168.
- Chavez, B., Cayón, G., y Jones, J. 2009. Modeling plantain (*Musa* AAB Simmonds) potential yield. *Agronomía Colombiana.* 27(3): 359-366.
- Conway, G. 1986. *Agroecosystem Analysis for Research and Development.* Bangkok: Winrock International. 105 p.
- Da Ros, C. y Aita, C. 2005. Volatilizacao de amonia com aplicacao de uréia na superfície do solo, no sistema plantío directo. *Ciencia rural* 35(4): 799-805.
- Damour, G., Ozier-Lafontaine, H. y Dorel, M. 2012. Simulation of the growth of banana (*Musa* spp.) cultivated on cover-crop with simplified indicators of soil water and nitrogen availability and integrated plant traits. *Field crops research.* 130: 99-108.
- Darst, B. 2001. Una visión sobre la agricultura sustentable en los países desarrollados. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* Nº12. 3p.
- De Wit, C. 1986. Modelling agricultural production. *Acta Horticulturae.* 184: 59-70.
- Degioanni, A., Cisneros, J., Cantero, A. y Videla, H. 2006. Modelo de simulación del balance hídrico en suelos con freática poco profunda. *Ct. Suelo (Argentina)* 24(1): 1-10.

- Doberman, A. y Cassman, K. 2004. Environmental dimensions of fertilizer nitrogen: What can be done to increase nitrogen use efficiency and ensure global food security?. En: Agriculture and the nitrogen cycle. Mosier, A., Syers, J. y Freney, J. (eds). Scope 65. Island Press. p. 261-278.
- Doorenbos, J. y Kassam, A.H. 1979. Respuesta del rendimiento al agua. Estudio FAO: Riego y drenaje No. 33. Roma, FAO. 212 p.
- Dorel, M., Achard, R. y Tixier, P. 2008. Simba-N: modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean. European Journal of Agronomy. 29: 38-45.
- Draye, X. 2002. Banana roots: Architecture and genetics. In: Plant roots, the hidden half. Tercera edición, CRC Press. P. 261-277.
- Echeverría, C., Huber, A. y Taberlet, F. 2007. Estudio de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile. Bosque 28(3): 271-280.
- El Fatih, M., Bakhiet, S. y Gasim, S. 2014. Growth and yield responses of banana plant to desuckering practice. International journal of science, environment and technology 3(1): 279-285.
- Estrada, M., Mendoza, J., Manzano, N., Flores, R., Gavrilov, I. y Acevedo, D. 2005. Balance de nitrógeno: una herramienta para conocer las pérdidas de nitrógeno en los campos agrícolas drenados. En: I<sup>er</sup> Congreso internacional de casos exitosos de desarrollo sustentable del trópico. Boca del Río Veracruz, México.
- FAOSTAT. 2014. Dirección de estadísticas. Consultado 20 septiembre 2014 (en línea) <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>
- Felicien, A. 2009. Un enfoque experimental y de modelización hacia la optimización de la fertilización nitrogenada en tres suelos Andinos. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE). 172p.
- Ferrer, F., Villar, J. y Stockle, C. 2000. Evaluación del modelo de simulación Cropsyst para maíz de regadío en el Valle del Ebro. Invest. Agr. Prod. Prot. Veg. 15(3): 237-251.
- Fogain, R. y Gowen, S. 2005. Root morphology and development of banana and plantain root systems in relation to nematode population. Fruits 60(5): 297-302.
- Fontanetto, H., Keller, O., Negro, C. y Belotti, L. 2006. Pérdidas por volatilización de amoníaco de diferentes Fuentes nitrogenadas en trigo bajo siembra directa. INTA – Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información técnica de trigo campaña 2006. Publicación Miscelánea N° 105. Pp. 63-68.
- Foresight. 2011. El futuro de los alimentos y la agricultura. Resumen ejecutivo. Oficina del Gobierno para la Ciencia, Londres. 44p.
- Fortescue, J., Turner, D. y Romero, R. 2011. Evidence that banana (*Musa* spp.), a tropical monocotyledon, has a facultative long-day response to photoperiod. Functional Plant Biology, 38: 867–878.
- French, J., Montiel, K. y Palmieri, V. 2014. La innovación en la agricultura: un proceso clave para el desarrollo sostenible. IICA. San José Costa Rica. 20p.
- Galán, V. y Robinson, J. 2013. Fisiología, clima y producción de banano. ACORBAT. Fortaleza, Ceará, Brasil. P. 43-57.

- Galvis, F., Uribe, A., Cayón, G., Magnitsky, S. y Henao, J. 2013. Effect of fertilizer insertion in the harvested mother banana plant pseudostem (*Musa* AAA Simmonds). *Agronomía Colombiana*. 31(1): 103-111.
- García-Linares, C., Martínez, M., Sánchez-Pérez, J., Justes, E. y Antigüedad, I. 2003. Aplicación del modelo STICS para la determinación de la lixiviación de nitratos bajo cultivo de remolacha azucarera en la zona no saturada del suelo. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*. 6.
- Gayoso, J. y Guerra, J. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26(2): 33-38.
- Gliessman, S. 2002. Agroecología. Procesos ecológicos en agricultura sostenible. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 359 pp.
- Gliessman, S., Rosado-May, F., Guadarrama-Zugasti, C., Jedlicka, J., Cohn, A., Méndez, V., Cohen, R., Trujillo, L., Bacon, C. y Jaffe, R. 2007. Agroecología: promoviendo una transición hacia la sostenibilidad. *Ecosistema* 16(1): 13-23.
- Gómez, C., Surga, J., Rumbos, R., Trujillo, V., Rosales, H., Vera, J. 2004. Evaluación de cuatro densidades de siembra en doble hilera para plátano (*Musa* AAB cv. Hartón) en la zona sur del lago de Maracaibo, durante el primer ciclo de cosecha. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 21 Supl. 1: 262-269.
- González, M. 2011. Introducción a la Agroecología. Serie: Agroecología y Ecología Agraria. SEAE. 70 p.
- González, M. y Cuenca, G. 2008. Respuesta de plantas de plátano (*Musa* AAB cv. Hartón) a la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares nativos e introducidos, bajo condiciones de campo. *Rev. Fac. Agron.* 25(3): 470-495.
- Gormley, L. y Sinclair, F. 2003. Modelaje participativo del impacto de los árboles en la productividad de las fincas y la biodiversidad regional en paisajes fragmentados en América Central. *Agroforestería en las Américas*. 10(39-40): 103-108.
- Goulding, K. 2004. Pathways and losses of fertilizer nitrogen at different scales. In: *Agriculture and the nitrogen cycle*. Mosier, A., Syers, J. y Freney, J. (eds). SCOPE 65. Pp 209-219.
- Govea, D. 1991. Influencia del número de hijos y frecuencia de deshije en el rendimiento del plátano (*Musa* AAB subgrupo plátano cv Hartón). IX Reunión ACORBAT. Pp. 473-482.
- Greenwood, D., Gastal, F., Lemaire, G., Draycott, A., Millard, P. y Neeteson, J. 1991. Growth rate and %N of grown crops: theory and experiments. *Annals of Botany*. 67: 181-190.
- Greenwood, D., Lemaire, G., Gosse, G., Cruz, P., Draycott, A. y Neeteson, J. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of botany* 66:425-436.
- Grimm, U. y Fassbender, H. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos con el agua. *Turrialba*. 31(2): 89-99.
- Guzmán, M. 2006. Estado actual y perspectivas futuras del manejo de la Sigatoka Negra en América Latina. ACORBAT. Joinville, Brasil. P. 83-91.
- Hart, R. 1979. Agroecosistema. Conceptos básicos. Centro Agronómico Tropical de Investigaciones y Enseñanza. Turrialba. Costa Rica. 211 p.
- Hauck, R. 1981. Nitrogen fertilizer effects on nitrogen cycle processes. En: Clark, F. y Rosswall, T. (eds.). *Terrestrial nitrogen cycles*. Ecological Bulletins, Stockholm. P. 551-362.

- Hofhansl, F., Wanek, W., Drage, S., Huber, W., Weissenhofer, A. y Richter, A. 2012. Controls of hydrochemical fluxes via stemflow in tropical lowland rainforest: effects of meteorology and vegetation characteristics. *Journal of hydrology* 452-453:247-258.
- Hunt, R. 1978. *Plant Growth analysis*. The institute of Biology's, Studies in Biology N° 96. Edited Edward Arnold. 69p.
- Hunt, R. 1982. *Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis*. Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, 226 p.
- Hunt, R. 1990. *Basic growth analysis. Plant growth analysis for beginners*. Unwin Hyman. London, 112 p.
- Hunt, R., Causton, D., Shipley, B. y Askew, P. 2002. A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany*. 90: 485-488.
- ICA, 1989. *El Análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Manual de Asistencia Técnica N° 47*. Instituto Colombiano Agropecuario. Bogotá, pp. 42-56.
- IGAC, 1978. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Bogotá, Colombia, 663 p.
- Infante, C., López, D., Medina, E. y Escalante, G. 1993. Distribución de las formas inorgánicas del nitrógeno en los flujos hídricos de un agroecosistema tropical. *Ecotrópicos* 6(2):13-23.
- Isa, D., Hofman, G. y Cleemput, O. 2006. Uptake and balance of fertilizer nitrogen applied to sugarcane. *Field crops research* 95: 348-354.
- Jaizme-Vega, M. y Rodríguez-Romero, A. 2008. Microbiología del suelo y sistemas agrícolas sostenibles: aplicación de microorganismos beneficiosos en agroecosistemas en las islas canarias. *Memorias, II Conferencia internacional sobre eco-biología del suelo y el compost*. 26-29 de Noviembre de 2008 - Puerto de la Cruz, Tenerife. P. 369-374.
- Jaramillo, A. 2003. Contenido de nutrimentos en la lluvia, agua de lavado foliar y escorrentía en cafetales con diferentes sombríos. *Meteorología Colombiana* 7: 135-140.
- Jaramillo-Robledo, A. 2005. La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). *Rev. Acad. Colom. Cienc.* 29(112): 371-382.
- Jarvis, A., Ramírez, J., Guevara, E. y Zapata, E. 2008. Global impacts and implications of climate change on banana: Production Systems. En: *Memorias XVIII Reunión ACORBAT*. Ecuador. P- 1-19.
- Jiménez, O. y Lhomme, J. 1994. Rainfall interception and radiation regime in a plantain canopy. *Fruits*. 49(2): 133-139.
- Jiménez, R. 2002. Agricultura sostenible para satisfacer el reto medioambiental de la producción agrícola. En: *Jornada temática aspectos medioambientales de la agricultura*. Madrid. 16p.
- Jones, C. y Kiniry, J. 1986. *CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*. C. Jones, J Kiniry (Eds.). Texas A&M Univ. Press, College Station. p. 194.
- Justes, E., B. Meynard, J. Mchet, J. y Thelier-Huche, L. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of botany* 74: 397-407.
- Khanna, P. 1981. Leaching of nitrogen from terrestrial ecosystem patterns. Mechanisms and ecosystem responses. En: Clark, F. y Rosswall, T. (eds.). *Terrestrial nitrogen cycles*. Ecological Bulletins, Stockholm. P. 343-352.

Kijewski, J., Colina, J. Steegmayer, P., Madero, A. y Bojanowski, Z. 1981. Estudio de suelos semidetallado sector Río Mucujepe – Río Escalante, Zona Sur del Lago de Maracaibo. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. 284p.

Klute A., 1986. Water retention: Laboratory methods. En: Klute A. (Ed.), Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy. 9: 635-662.

Knowles, R. 1982. Denitrification. Microbiological Reviews. 46(1): 43-70.

Kooman, P. 1995. Yielding ability of potato crops as influenced by temperature and day length. Ph.D. thesis. Landbouw Universiteit. Wageningen, The Netherlands. 155p.

Kouame, N., Assidjo, N., Dick, A. y Anno, A. 2013. Plantain tree growth (*Musa* sp., AAB cultivar Horn 1) modeling using the artificial neural networks method. European scientific journal, 9(33): 272-285.

Krishna, K., Durga, D., Ravi, I., Krishnakumar, S., Ramesh, S. y Velayudham, K. 2013. Water stress in banana-A review. Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences. 2(6): 1-18.

Kuttimani, R., Velayudham, E., Somasundaram, E. y Jagath, N. 2013. Effect of integrated nutrient management on corn and root growth and physiological parameters of banana. International journal of advanced research 1(8): 46-55.

Larcher, W. (2003). Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups. 4 ed. Edit. Springer-Verlag, Berlín. 519p.

Lecompte, F., Vaucelle, A., Pages, L. y Ozier-Lafontaine, H. 2002. Number, position, diameter and initial direction of growth of primary roots in *Musa*. Annals of botany 90: 43-51.

Link, E. 2005. Investigation and modeling of the optimization potential of adapted nitrogen fertilization strategies in corn cropping system with regard to minimize nitrogen losses. Tesis Doctoral. Institut fur Pflanzenbau und Grunland Universitat Hohenheim. 174 p.

Londoño, A., Montoya, D., León, J. y González, M. 2007. Ciclaje y pérdida de nutrientes del suelo en bosques alto andinos de Antioquia, Colombia. Revista de la Facultad Nacional de Agronomía (Medellín). 60(1):3717-3734.

López-Hernández, D., Infante, C. y Medina, E. 2005. Balance de elementos en un agroecosistema de caña de azúcar: I. Balance de nitrógeno. Tropicicultura. 23(4):212-219.

Ma, L., Ahuja, L. y Bruulsema, T. 2009. Current status and needs in modeling plant nitrogen uptake: A preface. En: Quantifying and understanding plant nitrogen uptake for systems modeling. Editado por Ma, L., Ahuja, L. y Bruulsema, T. CRC Press. p 1-12.

Macinnis-Ng, C., Flores, E., Muller, H. y Schwendenmann, L. 2012. Rainfall partitioning into throughfall and stemflow and associated nutrient fluxes: land use impacts in a lower montane tropical region of Panama. Biogeochemistry. 111(1-3): 661-676.

Machado, D. 2005. Un enfoque agroecosistémico para el manejo eficiente del suministro de nitrógeno en el cultivo de papa en los Andes venezolanos. Tesis doctoral. Universidad de Los Andes, Facultad de ciencias, Instituto de ciencias ambientales y ecológicas, Mérida, Venezuela. 233 p.

Machado, D. y Sarmiento, L. 2012. Respuesta del cultivo de papa a la combinación de diferentes fuentes de fertilización nitrogenada: evaluando la hipótesis de la sincronización. Bioagro 24(2): 83-92.

- Machado, D., Sarmiento, L. y González-Prieto, S. 2010a. The use of organic substrates of different C/N ratio in the regulation of nitrogen use efficiency and losses in a potato agroecosystem. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 88(3): 411-427.
- Machado, L., Urdaneta, S., Hernández, J., Abreu, A. y Marmol, L. 2010b. La Lenteja de agua (*Lemna sp*), en el comportamiento biológico de la lombriz roja (*Eisenia andrei*). *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 27(4): 545-558.
- Malone, R. y Ma, L. 2009. Nitrogen-Uptake effects on nitrogen loss in tile drainage as estimated by RZWQM. En: *Quantifying and understanding plant nitrogen uptake for systems modeling*. Editado por Ma, L., Ahuja, L. y Bruulsema, T. CRC Press. p 259-275.
- Maraux, F. y Rapidel, B. 1990. La simulación del balance hídrico. Aplicación para la determinación de fechas de siembra. Proyecto Regional de Agrometeorología CATIE-CIRAD-ORSTON. 36 p.
- Marcano, L. 2007. Dinámica del nitrato en dos suelos de la cuenca del lago de Valencia y su incidencia en la contaminación potencial de las aguas. Tesis Doctoral. UCV, Maracay. 174 p.
- Mariño, M., Mazzinti, A., Assuero, S., Gastal, F., Echeverría, H. y Andrade, F. 2004. Nitrogen dilution curves and nitrogen use efficiency during winter-spring growth of annual ryegrass. *Agronomy Journal* 96: 601-607.
- Mariscal, M., Orgaz, F. y Villalobos, F. 2000. Radiation-use-efficiency and dry matter partitioning of a young olive (*Olea europae*) orchard. *Tree Physiology*. 20: 65-72.
- Márquez, N. 1979. Estudio de suelos especial, distrito Colon, estado Zulia, Estación Local Chama. (Planos). Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Departamento de suelos, vegetación y fauna.
- Márquez, N., Olívalos, A., Salas, J. y Pereira, P. 1982. Estudio de nivel freático zona sur del lago de Mco. Sector Chama-Escalante, período: 1979-1981. Ministerio del ambiente y de los recursos naturales renovables. División de información e investigaciones del ambiente. Departamento suelos, vegetación y fauna. 25p.
- Marschner, H. 1997. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press Limited. 889 p.
- Martelo, M. 2004. Consecuencias ambientales generales del cambio climático en Venezuela. Consultado 04 junio 2015. <http://www.inameh.gob.ve/documentos/consecuencias.pdf>
- Martínez, H. 2014. Efecto del arreglo espacial de siembra y de la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares sobre la eficiencia de uso del nitrógeno en papa. Trabajo de Grado de Maestría. Postgrado en Ecología Tropical. Facultad de Ciencias. Universidad de los Andes.
- Martín-Prevel, P. 1979. Apuntes del curso sobre "la fisiología de la platanera en relación con las prácticas de cultivo" Colegio oficial de ingenieros agrónomos. Santa Cruz de Tenerife. 99p.
- Milera, S. y Crotti, C. 2005. Implementación del modelo Cropsyst para la simulación del rendimiento del cultivo de maíz en una región de Argentina. CIOMTA. Santa Fé, Argentina. 9 p.
- Monsi y Saeki, 1953 es citado aquí Manrique L., Kiniry J., Hodges T., Axness D. 1991. Dry matter production and radiation interception of potato. *Crop Science*, 31: 1044-1049.
- Montaño, N. y Sánchez-Yáñez, J. 2014. Nitrificación en suelos tropicales, asunto de competencia microbiana: un modelo basado en la teoría de Lotka-Volterra. *Ecosistemas* 23(3): 98-104
- Monteith, J. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 28: 277-294.

- Morales, N., Arévalo, K., Ortega, J., Briceño, B., Andrade, C. y Morales, E. 2006. El pH y la fuente nitrogenada como moduladores del crecimiento de la macrófita *Lemna sp.* Rev. Fac. Agron. (LUZ). 23(1): 67-79.
- Moreno, J. 2010. Evaluación del manejo del nitrógeno en el agroecosistema caña de azúcar. Tesis Doctoral. Posgrado en agroecosistemas tropicales. Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas, campus Veracruz, México. 129 p.
- Mosier, A., Syers, J. y Freney, J. 2004. Nitrogen fertilizer: An essential component of increased food, feed and fiber production. In: Agriculture and the nitrogen cycle. Editado por Mosier, A., Syers, J. y Freney, J. SCOPE 65. Pp 3-15.
- Muchow, R., Spillman, M., Wood, A. y Thomas, M. 1994. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. Aust. J. Agric. Res. 45: 37-49.
- Mukasa, H., Ocan, D. y Blomme, G. 2005. Estimación del tamaño del sistema radical utilizando muestras testigo. Infomusa, 14 (2): 21-23.
- Muñoz, I. 2007. Descargas contaminantes y su influencia en el sistema lago de Maracaibo, como medio receptor. ICLAN – Centro de información y documentación. Maracaibo. 98 p.
- Muñoz-Carpena, R., Parsons, J. y Ducheyne, S. 1999. Simulación con el modelo numérico WAVE del transporte de agua y nitrógeno a través de la zona no saturada en un cultivo de platanera. Estudios de la zona no saturada del suelo. Eds. Muñoz-Carpena, R., Ritter, A., Tascón, C. ICIA. p. 163-168.
- Muñoz-Carpena, R., Ritter, A., Socorro, A. and Pérez, N. 2002. Nitrogen evolution and fate in a Canary Islands (Spain) sprinkler fertigated banana plot. Agricultural Water Management. 52:93-117.
- Nava, C. 1977. Programa de investigación en plátano del Instituto de Investigaciones Agronómicas de la Universidad del Zulia. En: Primer encuentro nacional de investigadores en plátano y cambures. SVIA-LUZ-CIARZU-CENIAP. IIB5-1 – IIB5-7.
- Nava, C. 1987. Producción comercial de plátanos. Editorial América. Caraca – Venezuela. 112 p.
- Nava, C. 2004. Problemática del cultivo plátano en los municipios Sucre, Francisco Javier Pulgar y Colon del estado Zulia, orientado hacia la presentación de soluciones. Convenio CORPOZULIA-INIA-LUZ, Carta de entendimiento N° 9. 37 p.
- Nava, C. y Villarreal, E. 2000. Aplicación de nitrógeno, potasio, boro, magnesio y zinc a plantaciones de plátano, Musa AAB cv. Hartón en presencia de la Sigatoka negra. Revista de la facultad de agronomía (LUZ). 17:20-35.
- Ndabamenye, T., Vanlauwe, B., Van Asten, P., Blomme, G., Swennen, R., Uzayisenga, B., Annandale, J. y Barnard, R. 2013. Influence of plant density on variability of soil fertility and nutrient budgets in low input East African highland banana (*Musa spp.* AAA-EA) cropping systems. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 95:187-202.
- Nommik, H. 1973. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. Plant and Soil. 39: 309-318.
- Nyombi, K. 2010. Understanding growth of East Africa highland banana: experiments and simulation, Tesis Doctoral, Wageningen University, Wageningen, 198 pages.

- Nyombi, K., Van Asten, P., Corbeels, M., Taulya, G., Leffelaar, P. y Giller, K. (2010) Mineral fertilizer response and nutrient use efficiencies of East African highland banana (*Musa* spp., AAA-EAHB, cv. Kisansa). *Field Crops Res* 117:38–50.
- Obiefuna, J., Majumder, P. y Ucheagwu, A. 1983. Desuckering trial on paranta banana (*Musa* ABB group). *Acta Hortic.* (ISHS) 123:159-164.
- Odeke, M., Rubaihayo, P. y Osiru, D. 1999. Effect of spacing, stage and method of desuckering on bunch size and yield of banana cultivar Kibuzi (AAA-EA). *African crop science journal*, 7(4): 349-353.
- Odum, E. 1972. *Ecología*. 3ra edición. Edit. Interamericana. México. 653 p.
- Oluwafemi, B. 2013. Influence of number of sucker per plant on the growth, yield and yield components of plantain (*Musa* sp) in Ado-Ekii, Nigeria. *Agricultural Science Research Journal*. 3(2): 45-49.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 1996. Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos, OMM-N° 8. Sexta edición. Ginebra, Suiza. 538 p.
- Ortega, R y R. Mardoñez. 2005. Spatial variability of nitrogen mineralization in a volcanic soil of Ñuble province, VIII Region, Chile. *Agricultura técnica (Chile)* 65(2):221-231.
- Oyarzún, C., Godoy, R. y Leiva, S. 2002. Deposition atmosférica de nitrógeno en un transecto valle longitudinal-cordillera de Los Andes, centro-sur de Chile. *Revista chilena de historia natural* 75: 233-243.
- Palomares, J. 2010. Valoración de la calidad de los influentes y efluentes de las granjas acuícolas de la cuenca baja del Río Jamapa, Veracruz. Tesis Doctoral. Posgrado en agroecosistemas tropicales. Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas, campus Veracruz, México. 129 p.
- Penman, H., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A193*: 120–145.
- Penning de Vries, F. Jansen, D., Ten, H., y Bakema, A. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *Simulation monograph* 29. PUDOC, Wageningen, The Netherlands. p. 271.
- Pírela, M., Clavero, T., Fernández, L. y Sandoval, L. 2006. Balance del nitrógeno en el sistema suelo-planta con pasto Guinea (*Panicum maximum* Jacq) en condiciones de bosque seco tropical. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 23: 80-91.
- Ponette-González, A., Weathers, K y Curran, L. 2010. Tropical land-cover change alters biogeochemical inputs to ecosystems in a Mexican montane landscape. *Ecological applications* 20: 1820-1837.
- Prasertsak, P., Freney, J., Saffigna, P., Denmead, O., and Prove, B. 2001. Fate of urea nitrogen applied to a banana crop in the wet tropics of Queensland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59: 65–73.
- Price, N. 1996. Banana morphology – part I: roots and rhizomes. In: *Bananas and plantains*. Edited by S. Gowen. Ed. Chapman and Hall. Pp. 179 – 189.

- Quemada, M., Guibert, M. y López, J. 1999. Aplicación del modelo CERES para la simulación de los perfiles de humedad y de nitratos en el suelo bajo cultivo de trigo. Estudios de la zona no saturada del suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA: Tenerife. P. 147-150.
- Quintero, C. 2015. Ensamblaje de modelos hídricos de agroecosistemas en suelos bien drenados. Tesis de maestría, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Postgrado de Modelado y Simulación de Sistemas.
- Rao, N. 1984. Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology. Ser. B 34: 353-364.
- Raphael, L., Sierra, J., Recous, S., Ozier-Lafontaine, H. y Desfontaines, L. 2012. Soil turnover of crop residues from the banana (*Musa* AAA cv. Petite-Naine) mother plant and simultaneous uptake by the daughter plant of released nitrogen. European Journal of Agronomy. 38: 117-123.
- Rinaldi, M., Ventrella, D. y Gagliano, C. 2007. Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from Southern Italy. Agricultural water management 87 (2007) 91-105.
- Ritchie, J., Singh, U., Godwin, D., Bowen, W. 1998. Cereal growth, development and yield En: Understanding Options for Agricultural Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development. Tsuji, G., Hoogenboom, G., y Thornton, P. (eds). 7: 79-98.
- Rodríguez, G. 2001. El lago de Maracaibo como cuenca anaeróbica natural: uso de líneas de base históricas en estudios de impacto ambiental. Interciencia 26(10): 450-456.
- Rodríguez, M. y López, T. 2014. Comportamiento de la zona radical activa del banano en un ferrasol bajo riego por goteo superficial y subsuperficial. Revista ciencias técnicas agropecuarias 23(3): 5-10.
- Rodríguez, V. 2003. Avaliacao do estado nutricional e da fertilidade do solo na cultura do plátano (*Musa* AAB subgrupo plátano cv. Hartón). Tesis doctoral. USP Piracicaba, Brasil. 70p.
- Rodríguez, V. 2009. Diagnóstico nutricional suelo-planta y fertilización en el plátano. Simposio Internacional de plátano y banano. UNESUR. P. 39-42.
- Rodríguez, V. y Rodríguez, O. 1996. Características biométricas de la cepa de plátano Hartón (*Musa* sp. AAB Subgrupo plátano cv. Hartón) de una subpoblación con rendimientos de más de 18 kilogramos/racimo, en Venezuela. En: Memorias XII Reunión ACORBAT. República Dominicana. p. 198-207.
- Rodríguez, V. y Rodríguez, O. 1999. Fenología del plátano. En: Memorias curso de nutrición y fertilización del plátano. INPOFOS, A.S., UCLA, CIPLAT, SUVICA. El Vigía-Mérida. pp. 61-76.
- Rodríguez, V., Malavolta, E., Sánchez, A., Rodríguez, O., Lavoranti, O. y Guerra, E. 2007. Soil and plant reference norms for evaluating Horn plantain nutritional status. Communications in soil science and plant analysis. 38(9-10): 1371-1383.
- Rodríguez, W. y Leiner, D. 2006. Análisis del crecimiento vegetal. Volumen 7 de la Serie: Fisiología de la producción de los cultivos tropicales. Primera Edición. Editorial Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 37 p.
- Rojas, S., Belalcázar, S. y León, P. 1987. Caracterización del ciclo vegetativo del Clon de plátano Hartón (*Musa* AAB Simonds). En: Memorias VIII Reunión ACORBAT. Colombia. 543-553.

- Roose, E. 1981. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M. N° 130. Paris. 580p.
- Rosales, F., Alvares, J. y Vargas, A. 2008. Guía práctica para la producción de plátano con altas densidades, Experiencias de América Latina y el Caribe (F. Rosales, ed.). Bioersity International, Montpellier, Francia. 24p.
- Rotz, C., Taube, F., Russelle, M., Oenema, J., Sanderson, M. y Wachendorf, M. 2005. Whole-farm perspectives of nutrient flows in grassland agriculture. *Crop Sci.* 45:2139–2159
- Ruíz-Rosado, O. 2006. Agroecología: una disciplina que tiende a la transdisciplina. *Interciencia.* 31(2): 140-145.
- Rutter, A., Morton, A. y Robins, P. 1975. A predictive model of rainfall interception in forest. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology.* 12(1): 367-380.
- Ruy, S., Di Pietro, L. y Cabidoche, Y. 1999. Numerical modelling of water infiltration into the three components of porosity of a vertisol from Guadeloupe. *Journal of hydrology,* 221: 1-19.
- Ruy, S., Findeling, A., Cattan, P., Cabidoche, Y., Chambarel, A., y Sansoulet, J. 2005. Redistribution de la pluie et fonctionnement 3D du système sol-bananier. En: Colloque de Restitution du Programme Ecophère Continentale: Processus et Modélisation (ECCO), Toulouse, 5–7 December 2005 (eds P. Ackerer & B. Chastan). Institut National des Sciences de l'Univers, Toulouse, France.
- Salazar, M., Chaves, J. y Cooman, A. 2008. A model for the potential production and dry matter distribution of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Scientia Horticulturae* 115: 142-148.
- Samuels, G., Beale, A. y Torres, S. 1978. Nutrient content of plantain (*Musa* AAB Group) during growth and fruit production. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico.* 62(2):178-184.
- Sánchez, L., Ataroff, M. y López, R. 2002. Soil erosion under different vegetation covers in the Venezuelan Andes. *The environmentalist,* 22: 161-172.
- Sancho, H. 1996. Análisis del crecimiento y distribución de biomasa en plátano (*Musa* AAB). ACORBAT. Republica Dominicana. P. 178-186.
- Sangoi, L., Ernani, P. y Lech, V. 2003. Volatilização de N-NH<sub>3</sub> em decorrência da forma de aplicação de uréia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. *Ciencia rural* 33(4): 687-692.
- Sansoulet, J., Cabidoche, Y. y Cattan, P. 2007. Adsorption and transport of nitrate and potassium in an Andosol under banana (Guadeloupe, French West Indies). *European Journal of Soil Science,* 58: 478–489.
- Sansoulet, J., Cabidoche, Y., Cattan, P., Ruy, S., y Simunek, J. 2008. Spatially distributed water fluxes in an Andisol under Banana plants: Experiments and three dimensional modeling. *Vadose Zone J.* 7(2): 819-829.
- Sarmiento, G. 1984. Los ecosistemas y la Ecosfera. Primera edición Blume Ecología Barcelona.
- Sarmiento, G. y Acevedo, D. 1991. Dinámica del agua en el suelo, evaporación y transpiración en una pastura y un cultivo de maíz sobre un alfisol en los llanos occidentales de Venezuela. *Ecotrópicos.* 4(1):27-42.
- Sarmiento, L. 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Ph.D. Thesis. Université de Paris XI.

- Sarmiento, L. 2000. Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. *Mountain research and development* 20(3): 246-253.
- Sarmiento, L. y Bowen, W. 2002. Desarrollo de una variedad de papa andígena en Los Andes Venezolanos y su simulación por el modelo Substor. *Ecotrópicos*, 15(1): 111-122.
- Sau, F., López, F., Confalone, A. y Lizaso, J. 2010. Modelos de simulación del cultivo de maíz: fundamentos y aplicaciones en España. *Pastos* 40(2):117-138.
- Schlesinger, W. 2000. Biogeoquímica. Un Análisis del Cambio global. Editorial Ariel. BARCELONA pp. 371-388.
- Sharp, J., Thomas, S. y Brown, H. 2011. A validation of APSIM nitrogen balance and leaching predictions. *Agronomy New Zealand*. 41: 67-77.
- Simmonds, N. 1973. Los Plátanos: Técnicas agrícolas y producciones tropicales. Versión española de la 2da edición inglesa. Editorial Blume. Barcelona – España. 539 p.
- Steduto P., Hsiao T., Raes D. y Fereres E. 2009. Aqua Crop - The FAO Crop Model to simulate Yield Response to water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*. 101(3): 426-437.
- Steinhardt, U. y Fassbender, H. 1979. Características y composición química de las lluvias de los Andes occidentales de Venezuela. *Turrialba* 29(3):175-182.
- Stockle, C. y Kemanian, A. 2004. Driving crop growth models: radiation - versus transpiration - use efficiency. En: 4<sup>th</sup> International Crop Science Congress. Brisbane, Australia.
- Stockle, C., Donatelli, M. y Nelson, R. 2003. Cropsys, a cropping systems simulation model. *Europ. J. Agronomy*. 18: 289-307.
- Suárez C., Santana J. y Hernández E., 2003. Drenaje de nitratos en plataneras abonadas con dimetilpirazolfato y nitrógeno mineral. *Actas de Horticultura N° 39*. [http://www.sech.info/pdfs/actas/acta39/39\\_223.PDF](http://www.sech.info/pdfs/actas/acta39/39_223.PDF) (24/10/2008).
- Surga, J., Bolívar, A. y Trujillo, L. 1999. Caraterisation of the production and comercialisation of *Musa of Venezuela*. *International Symposium, Douala, Cameroon, 10-14 November. 1998*. C. Picq, E. Fouré y E.A. Frison, editor's p. 67-85.
- Swennen, R. y Langhe, E. 1985. Grow parameters of yield of plantain (*Musa cv. AAB*). *Annals of Botany*. 56: 197-204.
- Tesón, N. 2011. Balance hidrológico y flujo de nutrientes asociados al agua en plantaciones de *Eucalyptus grandis*, en Concordia (Entre Ríos). Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo. 201p.
- Thieuleux L. 2006. Biodisponibilité de l'azote en cultures bananières sur nitisol: application à la fertilisation azotée. Thèse de doctorat, Université Antilles-Guyane, Point-à-Pitre (Guadeloupe, FWI, France). 105 p.
- Thornton, P. y Cramer. L. (editors), 2012. Impacts of climate change on the agricultural and aquatic systems and natural resources within the CGIAR's mandate. CCAFS Working Paper 23. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Denmark. 200p. Available online at:
- Tixier, P., Dorel, M. y Malézieux, E. 2007. A Model-based approach to maximise gross income by selection of banana planting date. *Biosystems Engineering*. 96(4): 471-476.

- Tixier, P., Malézieux, E. y Dorel, M. 2004. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecological Modelling*. 180: 407-417.
- Torres, D., Florentino, A. y López, M. 2005. Pérdidas de suelo y nitrógeno por escorrentía en un ultisol degradado bajo diferentes condiciones de cobertura vegetal en Chaguaramas – Guárico. *Agronomía tropical* 55(4): 475-496.
- Tsubo, M. y Walker, S. 2005. Relationships between photosynthetically active radiation and clearness index at bloemfontein, South Africa. *Theoretical and applied climatology*, 80:17-25.
- Tsuji, G., Hoogenboom, G., y Thornton, P. 1998. Understanding options for agricultural production (Vol. 7). Springer Science & Business Media. Gran Bretaña. p. 399.
- Turner, D. 1972. Banana plant growth. 2. Dry matter production, leaf area and growth analysis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 12(55): 216-224.
- Turner, D. 1990. Modelling demand for nitrogen in the banana. *Acta Horticulturae* 275: 497-503.
- Turner, D. 1994. Bananas and Plantains, Chapter 3. En: *Handbook of environmental physiology of fruit crops, Volumen II: Sub-tropical and tropical crops*. Schaffer, B. y Andersen, P. CRC Press. p 37-64.
- Turner, D. 1996. Chapter 8. The response of the plant to the environment. In: *Bananas and plantains*. Edited S. Gowen. Chapman & Hall, INIBAP. Pp 206-229.
- Turner, D., Fortesene, J. y Thomas, D. 2007. Environmental physiology of bananas (*Musa* spp.). *Braz. Plant Physiol.* 19(4): 463-484.
- USDA. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. 88p.
- Valery, A. 2010. El proceso de volatilización dentro del ciclo del nitrógeno: métodos de estimación y principios de modelización. Trabajo mimeografiado no publicado. 23 p.
- Van Dijk, A. y Bruijnzeel, L. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Parte 1. Model description. *Journal of hydrology*, 247: 230-238.
- Van Ittersum, M., Cassman, K., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P. y Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research* 143: 4–17.
- Van Ittersum, M., Leffelaar, P., Van Keulen, H., Kropff, M., Bastiaans, L. y Goudriaan, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*. 18(3): 201-234.
- Van Veen, J. y Kuikman, P. 1990. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. *Biogeochemistry* 11: 213-233.
- Vaquero, R. 2005. Soil physical properties and banana root growth. En: *Banana root system: towards a better understanding for its productive management*. Proceedings of an international symposium held in San José, Costa Rica, 3-5 November 2003, Turner, D. and Rosales, F. (eds.), INIBAP, France, and MUSALAC and CORBANA, Costa Rica. p. 125-131.
- Vargas, A., Araya, M., Rojas, S. y Román P. 2005. Effect of removing or leaving the suckers at flowering of plantain (*Musa* AAB, cv. 'False Horn' type) on bunch weight and foliar nutrient content of the parent plant. *Scientia Horticulturae*. 107: 70-75.

Velazco, K., Noguera, N., Jiménez, L., Larreal, M. y Ettiene, G. 2009. Evaluación de nitratos y nitritos lixiviados en un sistema de pastoreo intensivo usando fertilizantes nitrogenados. Rev. Fac. Agron. (LUZ) 26: 23-38.

Vélez, L. 2004. El paradigma científico de las ciencias agrarias: una reflexión. Revista Facultad de agronomía. 57(1): sp. Consultado 10 febrero 2009. <http://www.agro.unalmed.edu.co/publicaciones/revista/docs/ARTICULO1.pdf>

Videla, C. 1994. La volatilización de amoníaco: una vía de pérdida de nitrógeno en sistemas agropecuarios. EEA Balcarce INTA Bol.Tec. 131, 16 p. En: Uso de modelos de balance para determinar los requerimientos de fertilizante nitrogenado de trigo y maíz. Roberto Álvarez. 1999. Ed. Eudeba p 14-15.

Videla, C., Echeverría, H., López, S., Melaj, M. y Bárbaro, N. 2004. Recuperación del <sup>15</sup>N-urea aplicado a la siembra o al macollaje en trigo en un suelo somero. Ciencia del suelo 22(2): 83-91.

Villa, P. 2007. Efecto de la nutrición nitrogenada sobre el balance de carbono en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*). Tesis de maestría, ICAE-Fac. Cienias-ULA. 233p.

Walmsley, D. y Twyford, I. 1968. The uptake of <sup>32</sup>P by Robusta Banana. Trop. Agric. Trin. 45(3):223-228.

Woomer, P., Bekunda, M., y Bwamiki, D. 1998. Modelling banana growth and soil organic matter dynamics with the century model. African Crop Science Journal. 6(2): 205-214.

Zaltauskaite, J. y Juknys, R. 2011. Comparison of principal ion fluxes and their modifications in the Forest Stands of different tree species. Baltic Forestry. 17(2):179-188.

Zotarelli, L., Scholberg, J., Dukes, M. y Muñoz-Carpena, R. 2007. Monitoring of nitrate leaching in Sandy soils: Comparison of three methods. J. Environ. Qual. 36: 953-962.

**ANEXOS**  
**CAPÍTULO III**

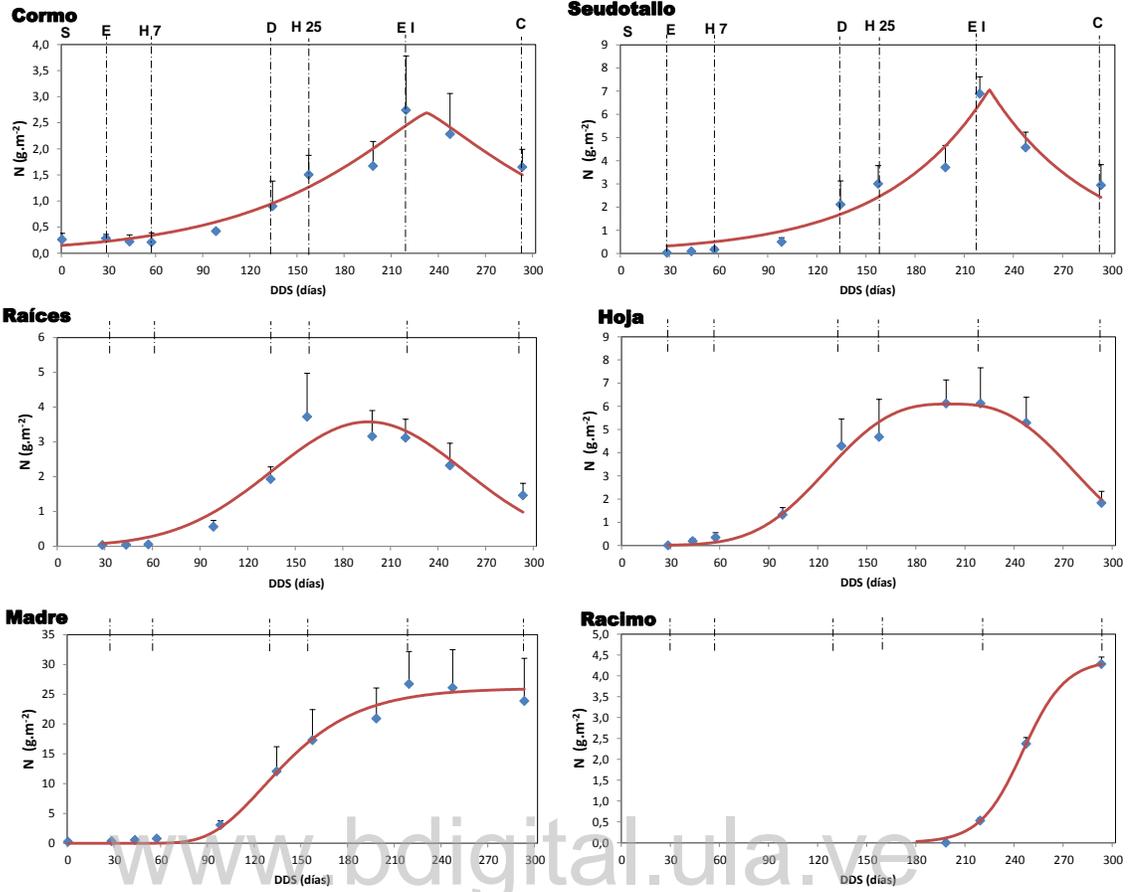
Anexo III-1. Funciones y Coeficientes que describen el curso de la fitomasa ( $\text{gMS.m}^{-2}$ ) de la unidad de producción y la madre, hijo y nieto con sus compartimientos en función de los días después de la siembra, del plátano Hartón.

Variable (Y)	Función	$r^2$	Coeficientes de las funciones			
			a	b	c	d
U. Producción	$y=a*e^{-b*e^{-c*x}}$	0.999	2866.0216	12.3355	0.0157	
Madre	$y=a*e^{-b*e^{-c*x}}$	0.998	2110.5134	19.7748	0.0208	
Raíces	$Y=a*e^{-0.5*((x-c)/b)^2}$	0.960	253.2998	67.4636	204.6567	
Cormo	$Y=a+b*x+c*x^2+d*x^3$	0.978	44.2083	-1.4593	0.0187	-0.0000441
Seudotallo	$Y=a*e^{-0.5*abs((x-d)/b)^c}$	0.984	650.3733	41.1374	1.3711	227.3562
Hojas	$Y=a*e^{-0.5*((x-c)/b)^2}$	0.992	309.1094	54.7261	207.7111	
Racimo	$f=a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.999	725.7205	8.0273	246.3308	
mNecromasa	$Y=d+a*x+b*x^2$	0.980	0.0059	0.2038		
Hijo	$y=a*e^{-b*e^{-c*x}}$	0.996	1499.0416	16.8453	0.0096	
Raíces	$Y=a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.986	147.605	34.087	219.408	
Cormo	$Y=a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.998	121.566	27.738	225.793	
Seudotallo	$Y= a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.991	147.936	21.230	245.205	
Hojas	$Y=a*b^x$	0.995	0.028	1.029		
hNecromasa	$Y=a*x^b$	0.988	1.00E-17	7.385		
Nieto	$Y=a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.961	2.013	9.693	211.395	

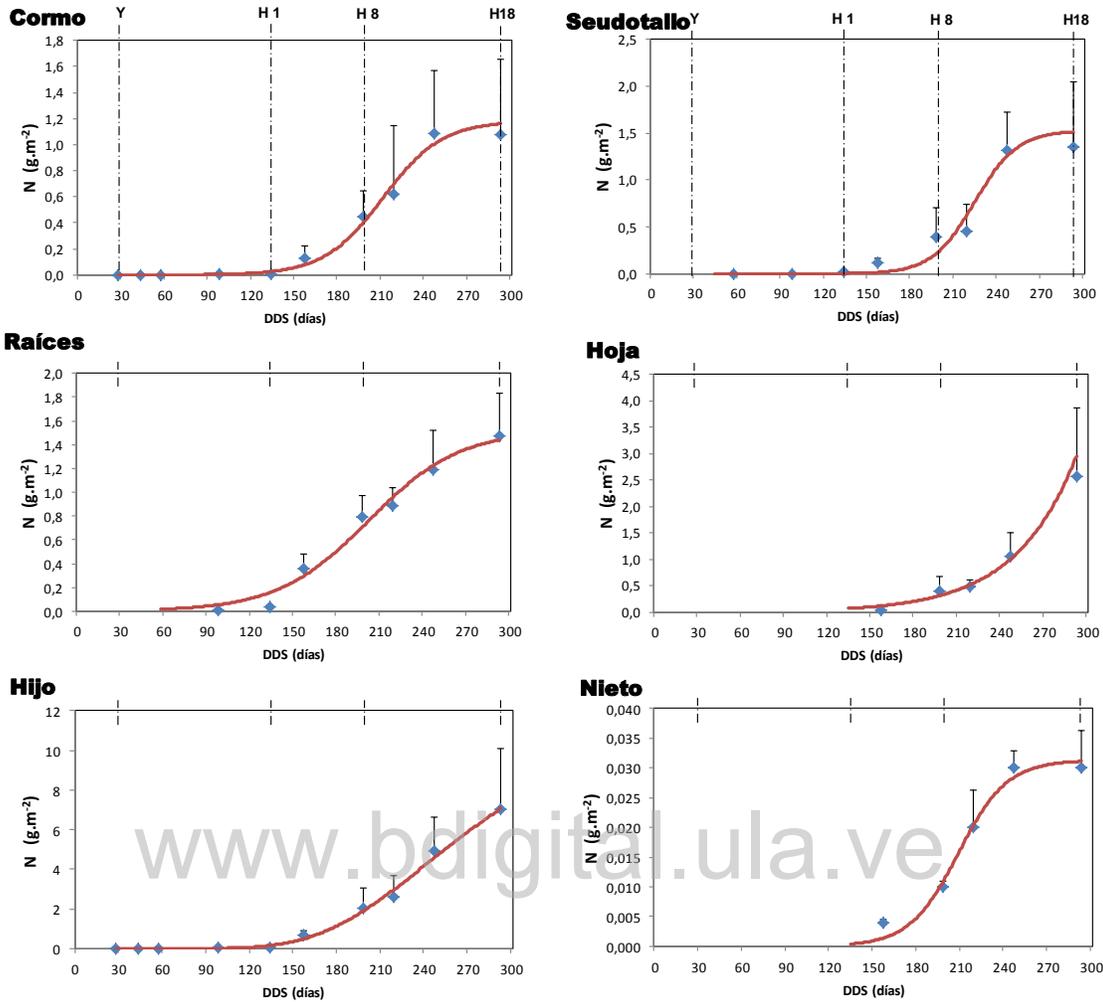
www.bdigital.ula.ve

Anexo III-2. Funciones y coeficientes que describen el curso del nitrógeno en la biomasa ( $\text{gMS.m}^{-2}$ ) de la unidad de producción, madre, hijo y nieto con sus compartimientos, con los días después de la siembra (x) del plátano Hartón.

Variable (Y)	Función	$r^2$	Coeficientes de las funciones			
			a	b	c	d
U. Producción	$y=a*e^{-b*e^{-c*x}}$	0.99	32.2127	22.001	0.023	
Madre	$y=a*e^{-b*e^{-c*x}}$	0.98	26.0317	41.999	0.0297	
Raíces	$Y=a*e^{-0.5*((x-c)/b)^2}$	0.942	3.5762	60.5253	195.5197	
Cormo	$Y=a*e^{-0.5*abs((x-d)/b)^c}$	0.959	2.69	53.3506	1.1943	232.1725
Seudotallo	$Y=a*e^{-0.5*abs((x-d)/b)^c}$	0.949	7.0756	31.7365	1.0000	224.826
Hoja	$Y=a*e^{-0.5*abs((x-d)/b)^c}$	0.988	6.0989	69.2429	2.7924	200.3096
Racimo	$Y= a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.999	4.3872	13.0476	244.8972	
mNecromasa	$Y= a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.984	12.5541	41.6131	188.4819	
Hijo	$y=a*e^{-b*e^{-c*x}}$	0.994	11.639	26.8747	0.0136	
Raíces	$Y=a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.974	1.5225	31.6937	202.5131	
Cormo	$Y=a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.986	1.1834	20.5685	211.673	
Seudotallo	$Y= a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.962	1.5285	14.8015	224.6407	
Hoja	$Y=a*b^x$	0.996	0.003	1.02		
hNecromasa	$Y= a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.992	0.645	21.4506	253.0315	
Nieto	$Y=a/(1+e^{-(x-c)/b})$	0.979	0.0313	16.7344	208.8240	



Anexo III-3. Curso del nitrógeno acumulado para la planta madre y los órganos. Los símbolos corresponden a los valores promedio en cada muestreo y las líneas verticales los valores respectivos a la desviación estándar, en su porción positiva. Las curvas corresponden a funciones de ajuste para cada variable (anexo III-2).



Anexo III-4. Curso del nitrógeno acumulado para la planta hijo, sus órganos y el nieto. Los símbolos corresponden a los valores promedio en cada muestreo, las líneas verticales los valores respectivos a la desviación estándar, en su porción positiva. Las curvas corresponden a funciones de ajuste para cada variable (anexo III-2).

Anexo III-5. Curvas que describen el N total acumulado en la Unidad de producción, planta madre, hijo y racimo.

Variable (Y)	Función	$r^2$	Coeficientes de las funciones		
			a	b	c
U. Producción	$Y=a*e(-b*\exp(-c*x))$	0,99	32,2127	22,001	0,023
Madre	$Y=a*e(-b*\exp(-c*x))$	0,99	26,0317	41,999	0,0297
Hijo	$Y=a*e(-b*\exp(-c*x))$	0,99	11,639	26,8747	0,0136
Racimo	$Y=a/(1+e(-(x-c)/b))$	1,00	4,3872	13,0476	244,8972

Anexo III-6. Concentración de las formas de nitrógeno mensual (mg.l<sup>-1</sup>) en la precipitación total (Pt), goteo+caída directa, flujo caulinar (FC), escorrentía (Es). Los números pequeños a la izquierda corresponden a la desviación estándar. Letras indican diferencias significativas a p<0,05 con respecto al tiempo. ND corresponden a flujos no medidos.

Forma de N	Flujo	Mes									
		JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
NH <sub>4</sub>	<b>Pt</b>	<b>0,23</b> 0,03 a	<b>0,29</b> 0,06 a	<b>0,29</b> 0,04 a	<b>0,23</b> 0,04 a	<b>0,27</b> 0,06 a	<b>0,41</b> 0,09 abc	<b>0,48</b> 0,01 bc	<b>0,57</b> 0,11 c	<b>0,33</b> 0,09 ab	<b>0,50</b> 0,05 bc
	<b>Goteo + caída directa</b>	<b>0,00</b> 0,00	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>0,22</b> 0,05 a	<b>0,45</b> 0,06 ab	<b>0,54</b> 0,01 bc	<b>0,74</b> 0,29 c	<b>0,49</b> 0,11 abc	<b>0,48</b> 0,01 abc
	<b>FC</b>	<b>0,00</b> 0,00	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>0,18</b> 0,05 a	<b>0,40</b> 0,08 abc	<b>0,50</b> 0,13 bc	<b>0,60</b> 0,09 c	<b>0,23</b> 0,06 a	<b>0,31</b> 0,07 abc
	<b>Es</b>	<b>0,34</b> 0,05 ab	<b>0,92</b> 0,29 bcd	<b>1,31</b> 0,42 d	<b>1,09</b> 0,30 cd	<b>0,44</b> 0,13 ab	<b>0,45</b> 0,08 ab	<b>0,52</b> 0,17 abc	<b>0,41</b> 0,09 ab	<b>0,26</b> 0,04 a	<b>0,25</b> 0,04 a
	<b>Pt</b>	<b>0,09</b> 0,02 ab	<b>0,03</b> 0,00 a	<b>0,06</b> 0,01 a	<b>0,05</b> 0,01 a	<b>0,14</b> 0,02 bc	<b>0,09</b> 0,02 ab	<b>0,16</b> 0,05 bc	<b>0,19</b> 0,05 c	<b>0,09</b> 0,03 ab	<b>0,18</b> 0,02 c
NO <sub>3</sub>	<b>Goteo + caída directa</b>	<b>0,00</b> 0,00	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>0,16</b> 0,05 a	<b>0,21</b> 0,03 a	<b>0,23</b> 0,02 a	<b>0,29</b> 0,11 a	<b>0,21</b> 0,05 a	<b>0,26</b> 0,07 a
	<b>FC</b>	<b>0,00</b> 0,00	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>0,17</b> 0,04 a	<b>0,28</b> 0,04 a	<b>0,25</b> 0,04 a	<b>0,31</b> 0,07 a	<b>0,17</b> 0,01 a	<b>0,30</b> 0,10 a
	<b>Es</b>	<b>0,99</b> 0,34 a	<b>1,18</b> 0,31 a	<b>4,54</b> 1,33 b	<b>3,98</b> 1,50 b	<b>0,68</b> 0,21 a	<b>1,34</b> 0,11 a	<b>0,62</b> 0,17 a	<b>0,62</b> 0,11 a	<b>0,43</b> 0,15 a	<b>0,54</b> 0,11 a
	<b>Pt</b>	<b>0,33</b> 0,01 a	<b>0,31</b> 0,05 a	<b>0,35</b> 0,03 a	<b>0,29</b> 0,05 a	<b>0,42</b> 0,08 ab	<b>0,50</b> 0,08 abc	<b>0,64</b> 0,04 bcd	<b>0,76</b> 0,16 d	<b>0,42</b> 0,11 ab	<b>0,68</b> 0,06 cd
	<b>Goteo + caída directa</b>	<b>0,00</b> 0,00	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>0,38</b> 0,01 a	<b>0,66</b> 0,08 ab	<b>0,78</b> 0,02 bc	<b>1,04</b> 0,31 c	<b>0,70</b> 0,06 abc	<b>0,73</b> 0,06 abc
N	<b>FC</b>	<b>0,00</b> 0,00	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>0,35</b> 0,04 a	<b>0,68</b> 0,10 bc	<b>0,75</b> 0,17 c	<b>0,92</b> 0,12 c	<b>0,40</b> 0,06 ab	<b>0,61</b> 0,15 abc
	<b>Es</b>	<b>1,33</b> 0,39 a	<b>2,10</b> 0,04 a	<b>5,85</b> 1,57 b	<b>5,07</b> 1,55 b	<b>1,12</b> 0,29 a	<b>1,78</b> 0,19 a	<b>1,14</b> 0,34 a	<b>1,03</b> 0,15 a	<b>0,69</b> 0,17 a	<b>0,79</b> 0,12 a

Anexo III-7. Datos de la dinámica hídrica mensual (mm). Precipitación total (Pt), flujo caulinar (FC), precipitación neta (PN), interceptión (INT), escorrentía (Es), infiltración (INF), evapotranspiración (ET). Los números pequeños corresponden a la desviación estándar, ND, corresponden a datos no medidos.

MES	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
<b>Pt</b>	<b>261</b>	<b>173</b>	<b>94</b>	<b>197</b>	<b>333</b>	<b>217</b>	<b>232</b>	<b>249</b>	<b>287</b>	<b>216</b>
<b>Goteo+Caída directa</b>	<b>261</b>	<b>173</b>	<b>94</b>	<b>197</b>	<b>270</b>	<b>167</b>	<b>174</b>	<b>194</b>	<b>227</b>	<b>179</b>
<b>FC</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>31</b>	<b>34</b>	<b>42</b>	<b>39</b>	<b>42</b>	<b>20</b>
					22	38	19	14	36	10
					4	3	6	16	14	4
<b>PN</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>302</b>	<b>201</b>	<b>217</b>	<b>234</b>	<b>269</b>	<b>199</b>
					26	40	25	29	50	14
<b>INT</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>31</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>16</b>
<b>Es</b>	<b>136</b>	<b>90</b>	<b>33</b>	<b>70</b>	<b>194</b>	<b>103</b>	<b>136</b>	<b>136</b>	<b>168</b>	<b>117</b>
	44	26	8	26	35	26	15	27	58	22
<b>INF</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>108</b>	<b>97</b>	<b>81</b>	<b>98</b>	<b>100</b>	<b>83</b>
<b>ET</b>	<b>77</b>	<b>83</b>	<b>77</b>	<b>80</b>	<b>70</b>	<b>59</b>	<b>68</b>	<b>54</b>	<b>52</b>	<b>43</b>

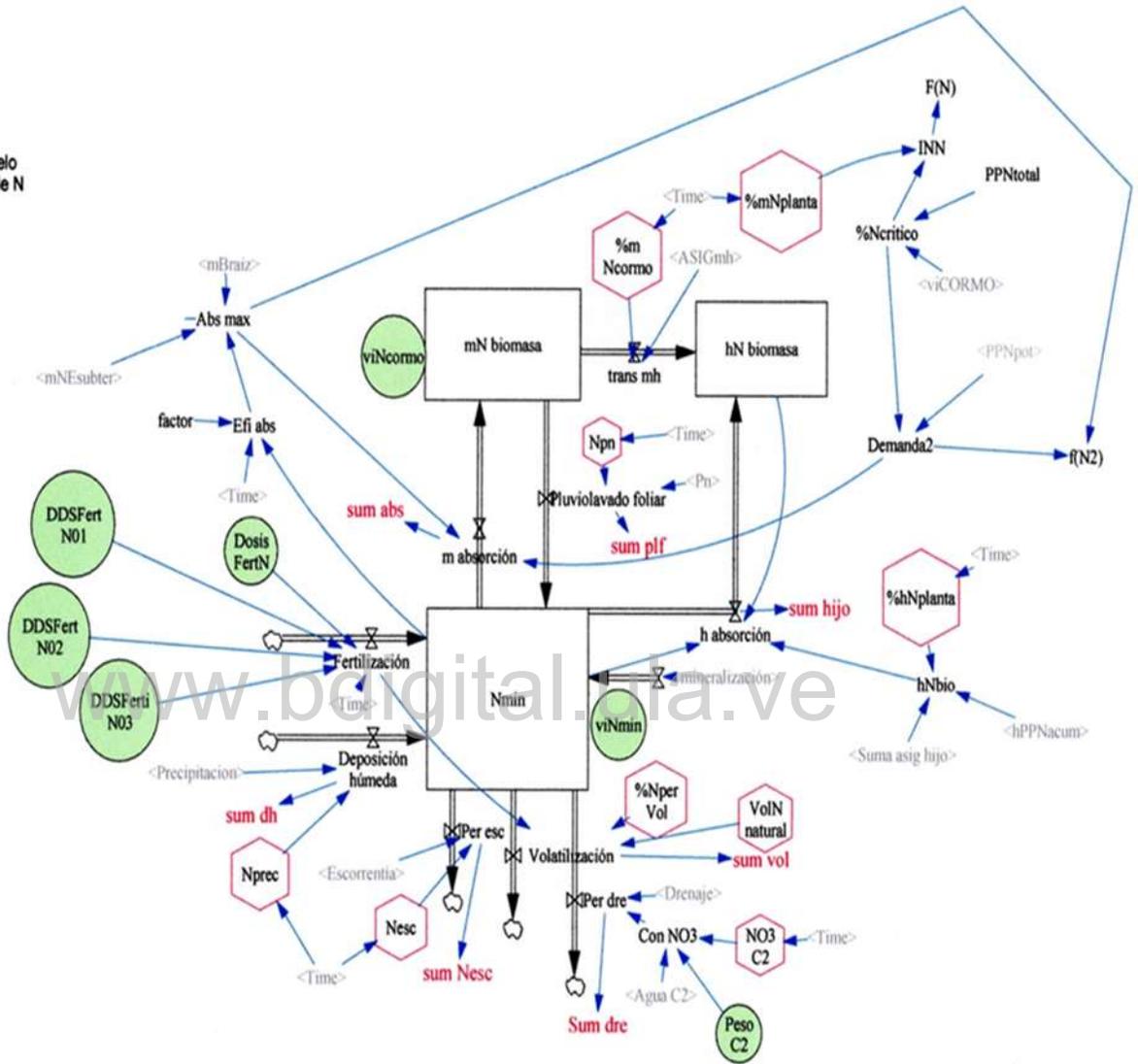
Anexo III-8. Datos del balance hídrico por período medición (mm). Precipitación total (Pt), flujo caulinar (FC), precipitación neta (PN), interceptión (INT), escorrentía (Es), infiltración (INF), humedad del suelo (S), evapotranspiración (ET). Los números pequeños corresponden a la desviación estándar. ND corresponden a datos no medidos y calculados por balance.

DDS	28	43	57	98	134	157	198	219	247	293	0 - 293
<b>Pt</b>	<b>199</b>	<b>84</b>	<b>60</b>	<b>199</b>	<b>236</b>	<b>277</b>	<b>267</b>	<b>198</b>	<b>211</b>	<b>443</b>	<b>2163</b>
<b>Goteo+Caída directa</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>228</b>	<b>201</b>	<b>153</b>	<b>164</b>	<b>352</b>	<b>1098</b>
						19	41	16	11	34	121
<b>FC</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>26</b>	<b>42</b>	<b>35</b>	<b>34</b>	<b>60</b>	<b>198</b>
						8	9	5	4	18	44
<b>PN</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>254</b>	<b>243</b>	<b>188</b>	<b>198</b>	<b>412</b>	<b>1296</b>
						27	50	21	15	52	165
<b>INT</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>31</b>	<b>100</b>
<b>Es</b>	<b>107</b>	<b>33</b>	<b>23</b>	<b>96</b>	<b>93</b>	<b>165</b>	<b>124</b>	<b>121</b>	<b>111</b>	<b>262</b>	<b>1135</b>
	33	14	9	24	31	41	36	23	92	83	388
<b>INF</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>89</b>	<b>119</b>	<b>67</b>	<b>87</b>	<b>150</b>	<b>512</b>
<b>S</b>	<b>121</b>	<b>132</b>	<b>154</b>	<b>144</b>	<b>140</b>	<b>150</b>	<b>162</b>	<b>151</b>	<b>171</b>	<b>170</b>	
	37	30	35	47	40	22	21	41	24	20	
<b>ET</b>	<b>67</b>	<b>40</b>	<b>37</b>	<b>105</b>	<b>94</b>	<b>52</b>	<b>78</b>	<b>47</b>	<b>58</b>	<b>80</b>	<b>658</b>

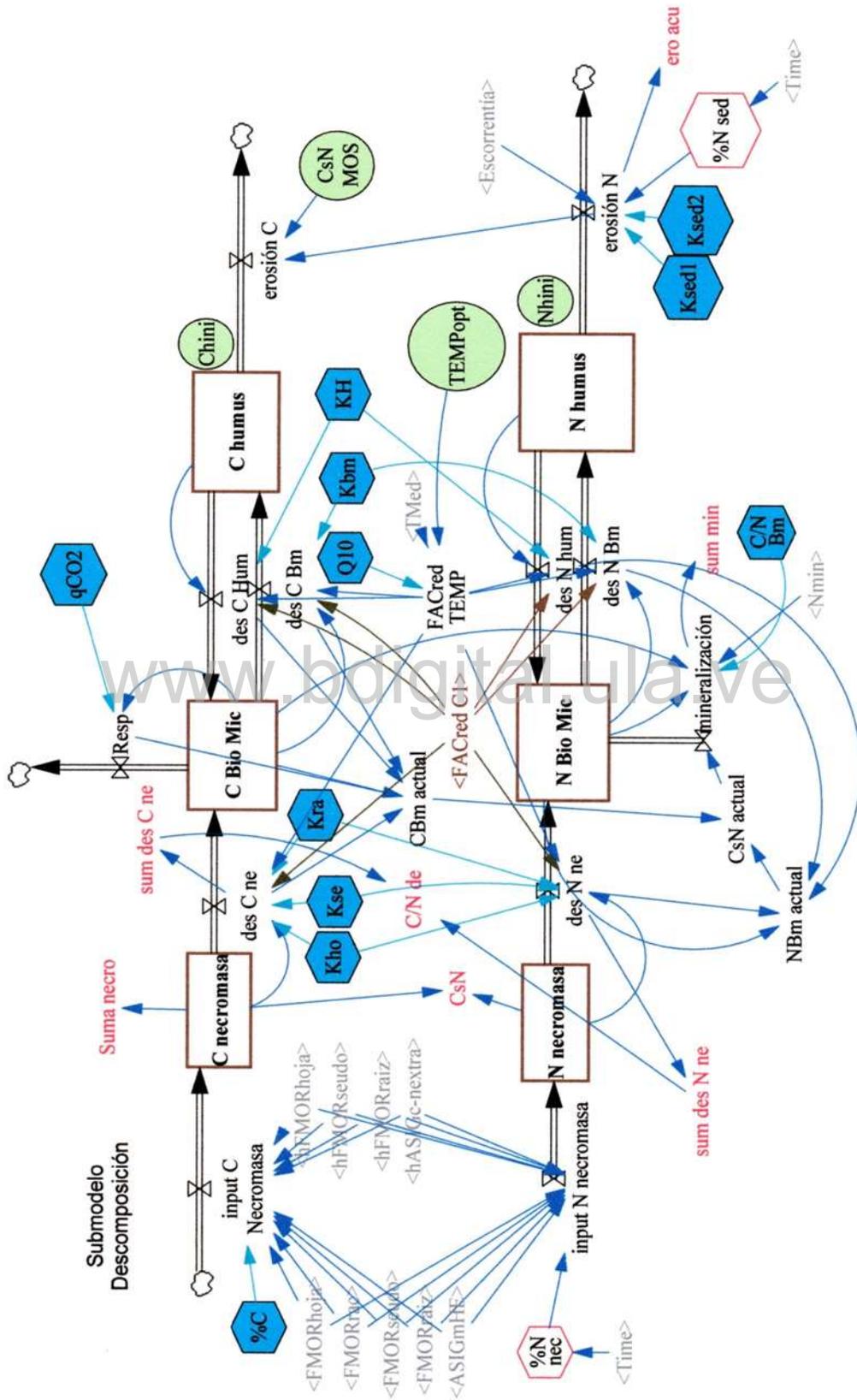




Submodelo  
Balance de N

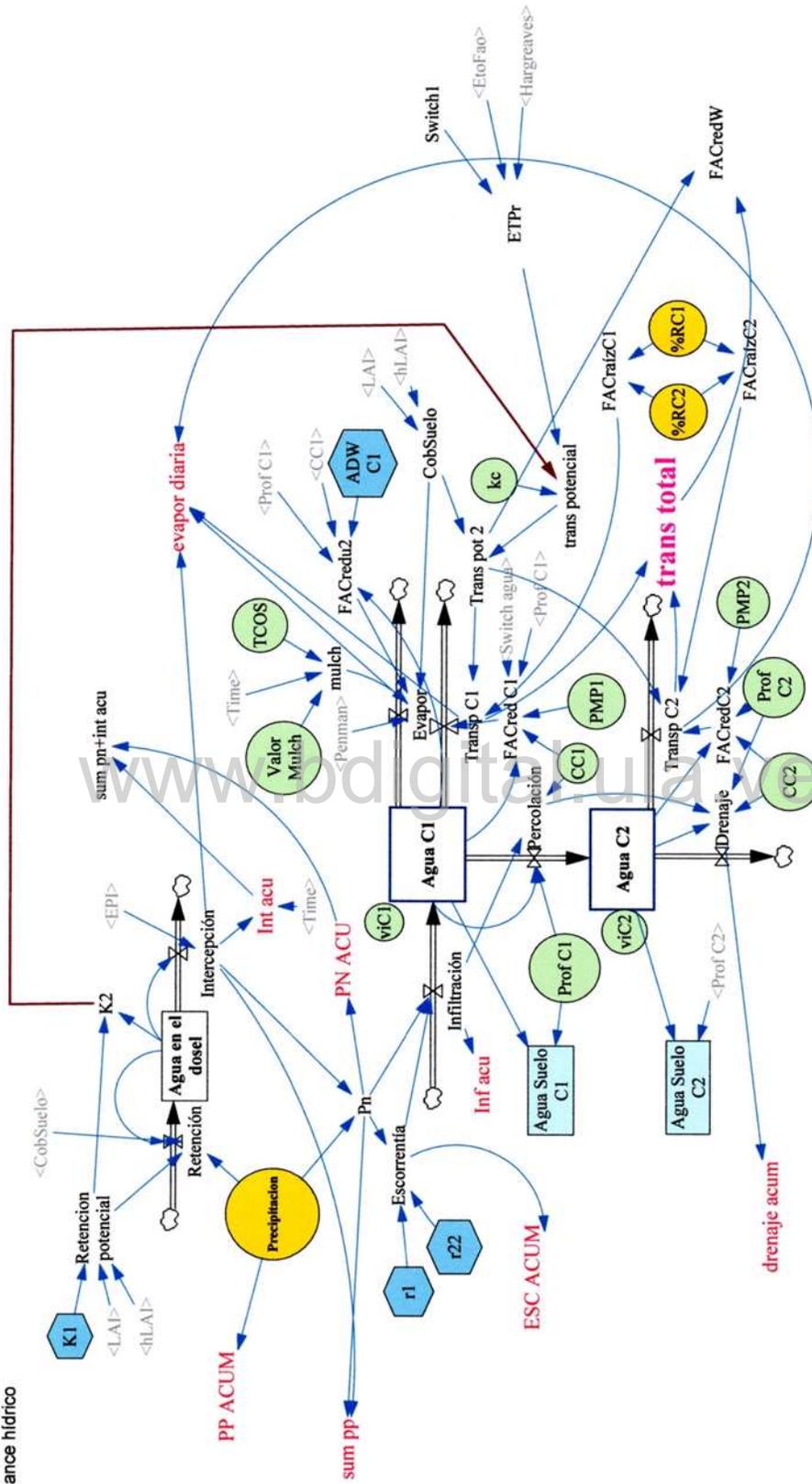


Anexo V-3. Submodelo Balance de N, vista general en VENSIM



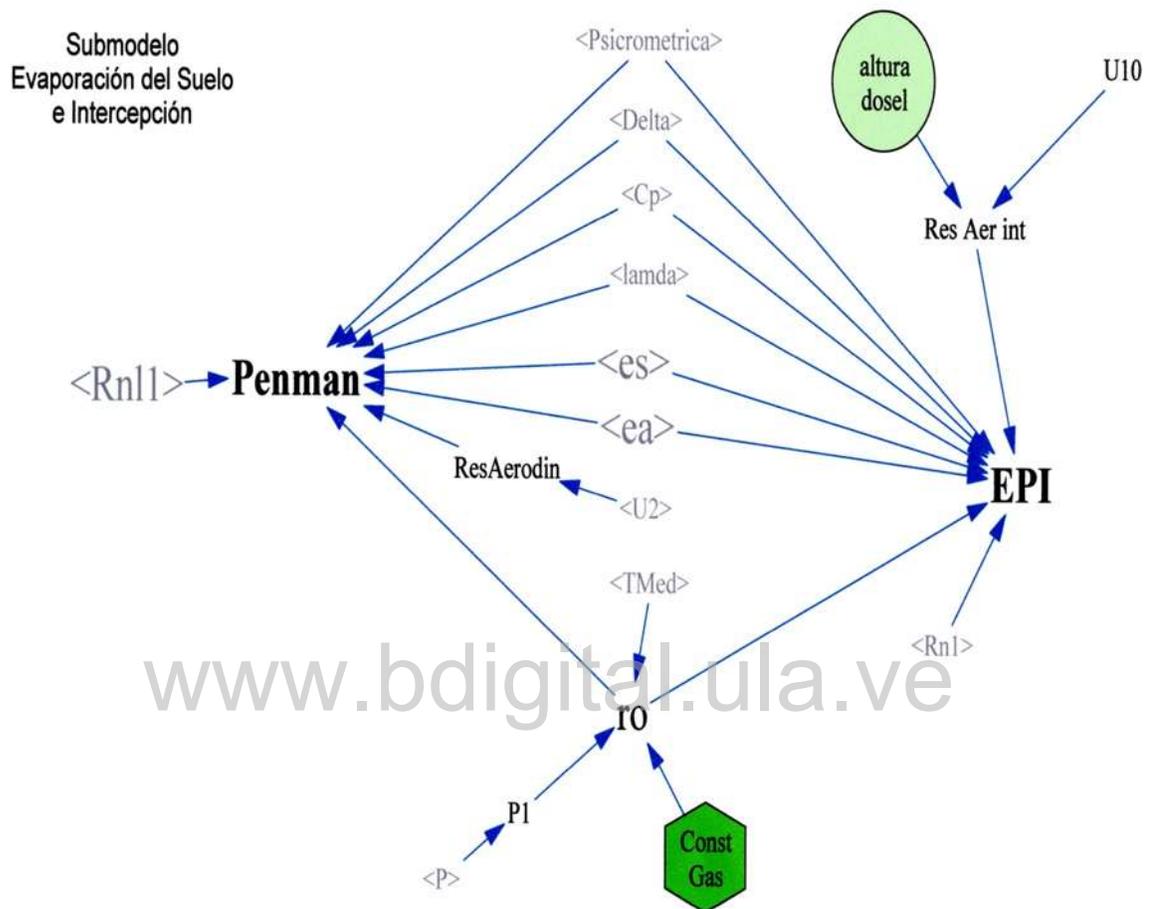
Anexo V-4. Submodelo Descomposición, vista general en VENSIM

Submodelo  
Balance hídrico



Anexo V-5. Submodelo Balance hídrico, vista general en VENSIM





Anexo V-7. Submodelo Evaporación del suelo e Infiltración, vista general en VENSIM