

UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES

Facultad de Ingeniería
Postgrado en Modelado y Simulación de Sistemas
Mérida - Venezuela

ENSAMBLAJE DE MODELOS DE BALANCE HÍDRICO DE AGROECOSISTEMAS CON SUELOS BIEN DRENADOS

www.bdigital.ula.ve

Autor: Lic. Carlos Guillermo Quintero Gull

Tutoras: Dra. Magdiel Ablan Bortone

Dra. Lina Sarmiento

Trabajo de Grado presentado ante la ilustre Universidad de Los Andes como
requisito parcial para la obtención del grado de
MAGISTER SCIENTIAE EN MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS

Enero 2015

Agradecimientos

En la culminación de este proyecto, son muchas las personas a las que quiero agradecer por su paciencia y comprensión, sin embargo quiero hacer mención especial a:

Dios todopoderoso por bendecirme para llegar hasta donde he llegado y poder concluir esta meta anhelada.

A mi madre Josefina por su apoyo incondicional y por confiar siempre en mí.

La Dra. Magdiel Ablan del Centro de Simulación y Modelos (CESIMO) de la Universidad de los Andes.

La Dra. Lina Sarmiento del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE) de la Universidad de los Andes.

Al Dr. Armando Borrero Molina de Departamento de Ciencias Aplicadas y Humanísticas de la Universidad de los Andes.

A la Ingeniero Yenny Araujo del Centro de Estudios Interactivos a Distancia (CEIDIS) de la Universidad de los Andes.

Al Centro de Desarrollo Científico Humanístico, Tecnológico y de las Artes (CDCHTA) de la Universidad de los Andes, por el financiamiento otorgado para la realización de este estudio bajo el código **I-1167-09-02-EM**.

Si se siente la gratitud y no se la expresa es como envolver un regalo y no darlo.

William Arthur Ward.

Ensamblaje de Modelos de Balance Hídrico de Agroecosistemas con Suelos Bien Drenados

Lic. Carlos Guillermo Quintero Gull
Trabajo de Grado
Maestría en Modelado y Simulación de Sistemas

Resumen:

En este trabajo se ensamblaron cuatro versiones de modelos de balance hídrico, comenzando con un modelo base (el más sencillo) hasta llegar al modelo de mayor grado de complejidad: La sencillez o complejidad en cada uno de los modelos planteados, se basa en diferentes metodologías para calcular el sub proceso de evapotranspiración en el balance hídrico. Para la validación y análisis discriminante de estos cuatro modelos, se cuenta con dos bases de datos provenientes de las localidades de Mixteque y Gavidia ubicadas en el Municipio Rangel en el estado Mérida, las cuales se refieren a registros climáticos, edáficos y de procesos hídricos en agroecosistemas de papa. Ambas bases de datos son referidas a un ciclo de cultivo de papa, pero en la localidad de Mixteque los datos se corresponden a un ciclo de cultivo completo, mientras que los datos de la localidad de Gavidia, corresponden a un ciclo de cultivo y un período largo en que el suelo estuvo desnudo. Todos los modelos son evaluados contrastando las series de valores simulados versus los datos en lo que se refiere a: contenido de agua en el suelo, drenaje y escorrentía, adicionalmente cada modelo tiene incorporado un módulo que calcula el porcentaje del error cuadrático medio, y el índice de eficiencia, de manera que en cada corrida ejecutada se puede verificar la bondad de ajuste en las métricas antes señaladas, con esto se puede identificar las posibles deficiencias en cada modelo, y en consecuencia, generar el modelo siguiente. Por último se realiza un análisis estadístico bayesiano, para decidir cuál es el mejor modelo en función al grado de complejidad, bondad de ajuste y cantidad de parámetros utilizados. En este proyecto se logró ensamblar una serie de modelos de

balance en cuya evaluación se obtuvo valores de r^2 por encima de 0,72 en el contenido de agua en el suelo, y valores mayores en el r^2 de 0,64 en el flujo de drenaje.

Palabras clave: Balance hídrico, Dinámica de Sistemas, Modelos, Evapotranspiración, Coeficiente de cultivo.

www.bdigital.ula.ve

Índice General

Agradecimientos	II
Lista de Tablas.....	VIII
Lista de Figuras.....	XII
1 Capítulo I: Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del Problema	5
1.2 Objetivos del Estudio.....	6
1.2.1. Objetivo General.....	7
1.2.2. Objetivos Específicos.....	7
1.3 Justificación del Estudio	7
1.4 Metodología Aplicada.....	8
1.5. Antecedentes	11
2. Capítulo II: Marco Referencial.....	20
2.1. Modelado y Simulación Ambiental	20
2.2. Dinámica de Sistemas.....	20
2.3. Proceso del Modelado.....	26
2.3.1. Clasificación de los Modelos:.....	29
2.3.2. Calibración y Validación de Modelos	30
2.3.3. Pruebas de bondad de ajuste	30
2.3.4. Análisis de Sensibilidad.	38
2.4. Descripción del Proceso del Balance Hídrico del ecosistema.	40
2.4.1. Precipitación	43
2.4.2. Intercepción	43
2.4.3. Infiltración de Agua en el Suelo	44
2.4.4. Escorrentía Superficial.....	44

2.4.5.	Drenaje.....	45
2.4.6.	Evapotranspiración	45
3	Capítulo III: Marco Metodológico	65
3.1.	Descripción de los Experimentos de Campo.....	65
3.1.1	Experimento 1 : Balance hídrico en Mixteque	65
3.1.2	Experimento 2. Balance hídrico en Gavidia	71
3.2.	Modelo 1 Base con ET0 :	74
3.2.1	Descripción del Modelo	74
	Compartimientos o Variables de Estado del Modelo Base	79
3.2.2	Calibración del Modelo	85
3.2.3	Análisis de Sensibilidad	86
3.3.	Modelo 2 Balance hídrico con coeficiente de cultivo variable en el tiempo....	87
3.3.1	Descripción del Modelo	87
	Calculo de los coeficientes del Cultivo	90
3.4.	Modelo 3 ET0 . Coeficiente Dual	92
3.4.1	Descripción del Modelo	92
3.5.	Modelo 4 Balance Hídrico ponderado por la Cobertura del Suelo	97
3.5.1	Descripción del Modelo	98
3.6.	Medidas de Bondad de Ajuste en Vensim	101
4.	Capítulo IV: Resultados	103
4.1	Modelo 1: Base con ET0 :	103
4.1.1.	Balance hídrico de Mixteque	103
	Resultados del Modelo 1 (Modelo Base)	106
4.2	Experimento de Gavidia:	120

4.2	Modelo 2: Modelo Base con <i>ETc</i> :	137
4.2.1	Resultados Balance hídrico de Mixteque:	137
4.2.2	Resultados Balance hídrico de Gavidia:	148
4.3	Modelo 3 Base con <i>ETcAdj</i> :	157
4.3.1	Balance hídrico del Experimento de Mixteque:	157
4.3.2	Modelo 3. Balance hídrico Gavidia:	164
4.4	Resultados Modelo 4 Balance para Suelo Desnudo:	171
4.4.1	Balance hídrico de Mixteque:	171
4.4.2	Balance hídrico de Gavidia:	177
4.5	Análisis Estadístico de Verosimilitud:	184
5.	Capítulo V: Conclusiones	187
	Anexos:	204
	Referencias Bibliográficas:	208

Lista de Tablas

Tabla 2. 1. Valores referenciales del Porcentaje del Error Cuadrático Medio	31
Tabla 2. 2. Valores Referenciales del Índice de Nash Stutcliffe	34
Tabla 3. 1. Balance hídrico de Mixteque. Distribución de las Laderas Según Pendiente y Altitud	66
Tabla 3. 2. Balance hídrico de Mixteque. Lista de Variables Disponibles.	69
Tabla 3.3. Gavidia. Lista de Variables Disponibles.	73
Tabla 3.4. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 1. Descripción de las variables exógenas	77
Tabla 3. 5. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 1. Descripción de los parámetros.	78
Tabla 3.6. Modelo 1. Variables de validación.	79
Tabla 3. 7. Descripción de los Compartimientos del Modelo 1.	79
Tabla 3.8. Descripción de los Procesos del Modelo 1.	80
Tabla 4. 1. Balance hídrico de Mixteque. Valores de pedregosidad, capacidad de campo punto de marchitez permanente de acuerdo a las laderas	105
Tabla 4. 2. Balance hídrico de Mixteque. Precipitación mensual (mm) año 2001	105
Tabla 4. 3. Balance hídrico de Mixteque. Valores Calibrados de los Parámetros de Escorrentía	106
Tabla 4. 4. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 1. Contenido de Agua en el Suelo. Descomposición del MSEP según Ladera	109
Tabla 4. 5. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 1. Drenaje. Descomposición del MSEP según Ladera	111
Tabla 4. 6. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 1. Escorrentía. Descomposición del MSEP según Ladera	114
Tabla 4. 7. Balance hídrico de Mixteque. Contenido de Agua en el Suelo cambios porcentuales del valor del Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del Parámetro r_1 , según Laderas	116

Tabla 4. 8. Balance hídrico de Mixteque. Contenido de Agua en el Suelo. Cambios porcentuales en los valores del Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del Parámetro r_{22} , según laderas	117
Tabla 4. 9. Balance hídrico de Mixteque. Contenido de Agua en el Suelo. Cambios porcentuales en los valores del Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante cambios del valor de la proporción de la pedregosidad, según Laderas.	118
Tabla 4. 10. Balance hídrico de Mixteque. Contenido de Agua en el Suelo. Distribución del Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del valor del punto de marchitez permanente (mm), según Laderas	119
Tabla 4. 11. Balance hídrico de Mixteque. Contenido de Agua en el Suelo. Distribución del Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del valor de la capacidad de campo (mm), según Laderas	120
Tabla 4. 12. Balance hídrico de Gavidia. Valores de la proporción de la pedregosidad, capacidad de campo punto de marchitez permanente.	121
Tabla 4. 13. Balance hídrico de Gavidia. Valores Calibrados de los Parámetros de Escorrentía.....	122
Tabla 4. 14. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 1. Contenido de Agua en el suelo. Descomposición del MSEP según Parcelas.....	126
Tabla 4. 15. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 1. Drenaje. Descomposición del MSEP según Parcelas.....	128
Tabla 4. 16. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 1. Escorrentía. Descomposición del MSEP según Parcelas	132
Tabla 4. 17. Balance hídrico de Gavidia. Contenido de agua en el suelo. Cambios porcentuales del porcentaje del error cuadrático medio ante cambios del parámetro r_1 , según parcelas.....	134
Tabla 4. 18. Gavidia. Contenido de agua en el suelo. Cambios porcentuales del porcentaje del error cuadrático medio antes cambios del parámetro r_{22} , según parcelas	134
Tabla 4. 19. Balance hídrico de Gavidia. Contenido de Agua en el Suelo, cambios porcentuales en el Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante	

Cambios del valor del punto de marchitez permanente (mm), según Parcelas	135
Tabla 4. 20. Balance hídrico de Gavidia. Contenido de Agua en el Suelo, cambios porcentuales en el Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del valor de la proporción de la pedregosidad, según Parcelas.....	136
Tabla 4. 21. Balance hídrico de Gavidia. Contenido de Agua en el Suelo, cambios porcentuales en el Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del valor de la capacidad de campo (mm) según Parcelas.....	137
Tabla 4. 22. Balance hídrico de Mixteque. Cobertura del Suelo Máxima, e Índice de Área Foliar Máximo por Ladera	137
Tabla 4. 23. Balance hídrico de Mixteque. Duración de las Etapas (días) según Laderas	139
Tabla 4. 24. Balance hídrico de Mixteque Evapotranspiración y Promedio de Días entre eventos de Lluvia y/o Riego por Laderas.....	140
Tabla 4. 25. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 2. Valores del Coeficiente del cultivo (Dmnl) según Laderas, por Etapas	142
Tabla 4. 26. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 2. Contenido de Agua en el Suelo. Descomposición del MSEP según Ladera	144
Tabla 4. 27. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 2. Drenaje. Descomposición del MSEP según Ladera	147
Tabla 4. 28. Balance hídrico de Gavidia. Valores Máximos de Cobertura del Suelo e Índice de Área Foliar por Parcelas	148
Tabla 4. 29. Balance hídrico de Gavidia. Duración de las Etapas (días) según Parcelas	149
Tabla 4. 30. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 2. Promedio de Días entre eventos de Lluvia, Evapotranspiración Promedio, y Valores del Coeficiente Inicial durante la etapa inicial	150
Tabla 4. 31. Balance hídrico de Gavidia Modelo 2. Coeficientes del Cultivo Medio KcMed Calibrados	151
Tabla 4. 32. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 2. Contenido de Agua en el suelo. Descomposición del MSEP según Parcelas.....	154

Tabla 4. 33. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 2. Drenaje. Descomposición del MSEP según Parcelas.....	156
Tabla 4. 34 Balance hídrico de Mixteque. Duración de las Etapas (días) según Laderas	158
Tabla 4. 35. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 3. Valores del Coeficiente del Basal del cultivo (Adimensional) según Laderas, por Etapas	158
Tabla 4. 36. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 3. Contenido de Agua en el Suelo. Descomposición del MSEP según Ladera	160
Tabla 4. 37. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 3. Drenaje. Descomposición del MSEP según Ladera	163
Tabla 4. 38. Balance hídrico de Gavidia. Duración de las Etapas (Días) según Parcelas	164
Tabla 4. 39. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 3. Contenido de Agua en el Suelo. Descomposición del MSEP según Ladera	166
Tabla 4. 40. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 3.Drenaje. Descomposición del MSEP según Ladera	168
Tabla 4. 41. Balance hídrico de Mixteque. Valor Calibrado Evaporación del Suelo	171
Tabla 4. 42. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 4. Contenido de agua en el suelo. Descomposición del MSEP según Ladera.....	173
Tabla 4. 43. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 4. Drenaje. Descomposición del MSEP según Ladera	176
Tabla 4. 44. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 4. Contenido de Agua en el suelo. Descomposición del MSEP según Parcelas.....	179
Tabla 4. 45. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 4. Drenaje. Descomposición del MSEP según Parcelas.....	182
Tabla 4. 46. Balance hídrico de Mixteque Análisis Bayesiano del Contenido de Agua en el suelo según Modelos	184
Tabla 4. 47. Balance hídrico de Mixteque Análisis Bayesiano Drenaje según Modelos	185

Tabla 4. 48. Balance hídrico de Gavidia. Análisis Bayesiano Contenido de agua en el Suelo según Modelos	185
Tabla 4. 49. Balance hídrico de Gavidia. Análisis Bayesiano Drenaje según Modelos	186
Tabla 5. 1. Valores máximos y mínimos del porcentaje del error cuadrático medio e índice de eficiencia para los subprocesos de drenaje y escorrentía, en los 4 modelos de balance hídrico	187
Tabla 5. 2 Experimento de Mixteque. Distribución de la entrada de agua al agroecosistema, y porcentaje de salida de acuerdo al los subprocesos de drenaje escorrentía y evapotranspiración	188
. Tabla 5. 3 Experimento de Gavidia. Distribución de la entrada de agua al agroecosistema, y porcentaje de salida de acuerdo a los subprocesos de drenaje escorrentía y evapotranspiración.	¡Error! Marcador no definido.

www.bdigital.ula.ve

Lista de Figuras

Figura 1. 1 Esquema General de la Metodología Aplicada.	10
Figura 1. 2 Valores de Potencial Máximo de retención de Humedad.....	12
Figura 2. 1 Diagrama de Lazos y Causal.	22
Figura 2. 2 Diagrama de retroalimentación Positiva y Negativa.....	23
Figura 2. 3 Elementos de un Diagrama de Compartimientos y Flujos.	24
Figura 2. 4 Estructura General de un Diagrama de Compartimientos y Flujos.	25
Figura 2. 5 Tipos de comportamiento en la dinámica de sistemas.....	26
Figura 2. 6 Balance Hídrico en un ecosistema, suelo-planta- atmósfera.	42
Figura 2. 7 Relación entre los Métodos de Evapotranspiración.	55
Figura 3. 1. Mixteque. Ubicación de las Laderas del experimento.....	68
Figura 3. 2. Ubicación Geográfica de la Localidad de Mixteque y Gavidia- Mérida Venezuela.	70
Figura 3. 3 Estructura del Modelo Base de Balance Hídrico	75
Figura 3. 4 Estructura Modelo de Balance Hídrico 2.....	88
Figura 3. 5 Comportamiento del coeficiente del cultivo a lo largo de las.....	89
Figura 3. 6 Estructura del Modelo de Balance Hídrico 3	93
Figura 3. 7 Estructura del Modelo de Balance Hídrico 4.	100
Figura 3. 8. Esquema general para el cálculo del porcentaje del error	102
Figura 4. 1. Balance hídrico de Mixteque. Precipitación Acumulada durante el experimento según Laderas.....	104
Figura 4. 2. Balance hídrico de Mixteque. Distribución del riego acumulado durante los días del experimento según laderas.....	104
Figura 4. 3 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 1 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	107
Figura 4. 4: Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del contenido de agua en el suelo para el Modelo 1	109

Figura 4. 5. Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 1 según laderas, indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	111
Figura 4. 6. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 1	112
Figura 4. 7. Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación de la escorrentía utilizando el Modelo 1 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	113
Figura 4. 8. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados de la escorrentía para el Modelo 1	115
Figura 4. 9. Balance hídrico de Gavidia. Precipitación Acumulada durante los días del experimento.....	121
Figura 4. 10 Balance hídrico de Gavidia. Contenido de Agua en el Suelo Datos y Simulados del Modelo 1. (a) Datos. (b) Simulados	123
Figura 4. 11. Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 1 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	124
Figura 4. 12. Balance hídrico de Gavidia. Recta de regresión medidos/simulados del contenido de agua en el suelo para el Modelo 1	127
Figura 4. 13. Balance hídrico de Gavidia. Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 1	129
Figura 4. 14 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 1 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	130
Figura 4. 15 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación de la escorrentía utilizando el Modelo 1 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	131
Figura 4. 16. Balance hídrico de Gavidia. Recta de regresión medidos/simulados de la escorrentía para el Modelo 1	133

Figura 4. 17 Estimación del coeficiente Inicial del cultivo por Ladera. (a) Baja, (b) Media, (c) Alta.....	140
Figura 4. 18. Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 2 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia.....	143
Figura 4. 19. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del.....	144
Figura 4. 20. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 2 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia.....	145
Figura 4. 21 Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del.....	147
Figura 4. 22 Balance hídrico de Gavidia. Distribución de la Precipitación en el Tiempo (Cantidad mm)	149
Figura 4. 23 Coeficiente Inicial del cultivo Gavidia.....	150
Figura 4. 24 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 2 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia.....	152
Figura 4. 25. Balance hídrico de Gavidia. Recta de regresión medidos/simulados	153
Figura 4. 26 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 2 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia.....	155
Figura 4. 27. Balance hídrico de Gavidia. Recta de regresión medidos/simulados del.....	157
Figura 4. 28 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 3 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia.....	159

Figura 4. 29. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados	161
Figura 4. 30 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje el Modelo 3 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia.....	162
Figura 4. 31. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 3	163
Figura 4. 32 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 3 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	165
Figura 4. 33. Balance hídrico de Gavidia Recta de regresión medidos/simulados del.....	167
Figura 4. 34. Balance hídrico de Gavidia Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 3	169
Figura 4. 35 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 3 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	170
Figura 4. 36. Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 4 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	172
Figura 4. 37. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del.....	174
Figura 4. 38 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 4 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia.....	175
Figura 4. 39. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 4	176
Figura 4. 40 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 4 según	

parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	178
Figura 4. 41. Balance hídrico de Gavidia Recta de regresión medidos/simulados del	180
Figura 4. 42. Balance hídrico de Gavidia Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 4	181
Figura 4. 43 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 4 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia	183
Figura 5. 1. Índice de eficiencia (panel superior) y % del error cuadrático medio (panel inferior) para los diferentes modelos en todas las laderas de Mixteque. Valores de eficiencia mayores a 0.6 y %ECM menores a 20, las líneas punteadas en los gráficos correspondientes, denotan un buen ajuste Los puntos más grandes denotan el promedio para todas las laderas.....	190
Figura 5. 2. Índice de eficiencia (panel superior) y % del error cuadrático medio (panel inferior) para los diferentes modelos en todas las parcelas de Gavidia, en el contenido de agua en el suelo. Valores de eficiencia mayores a 0.6 y %ECM menores a 20, las líneas punteadas en los gráficos correspondientes, denotan un buen ajuste. Los triángulos más grandes denotan el promedio para todas las parcelas.	191
Figura 5. 3 Índice de eficiencia (panel superior) y % del error cuadrático medio (panel inferior) para los diferentes modelos en todas las laderas de Mixteque en el drenaje. Los triángulos denotan el promedio para todas las laderas	193
Figura 5. 4. Índice de eficiencia (panel superior) y % del error cuadrático medio (panel inferior) para los diferentes modelos en todas las parcelas de Gavidia. Los triángulos denotan el promedio para todas las parcelas	194
Figura 5. 5. Matriz resultante del cálculo de la distancia de Mahalanobis para el experimento de Mixteque, Gavidia y consolidado	197
Figura 5. 6. Gráficos de regresión del contenido de agua en el suelo con los datos para los 4 modelos, con los datos consolidados de los dos experimentos.	

Las líneas en rojo son del experimento de Gavidia y en negro corresponden a Mixteque	199
Figura 5. 7. Gráficos de regresión del drenaje con los datos para los 4 modelos, con los datos consolidados de los dos experimentos. Los puntos en rojo son del experimento de Gavidia y en negro corresponden a Mixteque	200

www.bdigital.ula.ve

1 Capítulo I: Introducción

El agua, como componente vital, ejerce un papel protagónico en la subsistencia y desarrollo de los seres vivos dentro de sus respectivos entornos, pues forma parte en un alto porcentaje de las estructuras que conforman a estos organismos. Desde el punto de vista agrícola este elemento es fundamental, tomando en cuenta que, en la realización de prácticas de cultivo, es uno de los factores principales que puede limitar la producción o fomentar el desarrollo agrícola. En este sentido Acevedo (1988), afirma que es de gran interés:

“...comprender la dinámica temporal y espacial del agua a través de un agroecosistema, describiendo y cuantificando las diferentes entradas, salidas y reservorios, que marcan el ritmo de los principales procesos abióticos y/o bióticos, ya que el agua actúa como “fuente motora” de dichos procesos, no escapando ningún agroecosistema a su influencia ya sea por su presencia o por su ausencia temporal y/o espacial.”

El estudio y la descripción de las diferentes entradas, salidas y reservorios de agua en un agroecosistema, es lo que se denomina balance hídrico. Los modelos de simulación constituyen una herramienta de gran utilidad para lograr una mejor comprensión de los procesos que forman parte de dicho balance, (Wainwright, 2004). A través de estos modelos, se puede lograr el estudio de forma integrada de todos estos aspectos, conformando una herramienta de utilidad para el manejo del agua en la agricultura.

El concepto de balance hídrico se deriva del concepto de balance en las áreas de contabilidad administrativa. Es decir, es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado (Gaytan, 2009). De manera que, la modelización y posterior cuantificación de los procesos que intervienen en el balance, pueden usarse

para comprender y establecer políticas que influyan en el manejo, crecimiento y riego de los cultivos (Wegehenkel, 2000).

Este trabajo se centra en la modelización del balance hídrico en los agroecosistemas paperos andinos. Una de sus principales contribuciones es el desarrollo de un modelo elaborado en una plataforma de dinámica de sistemas, adaptado a las características propias y particulares de los agroecosistemas y de los cultivos. Esto permite obtener una descripción detallada de los distintos procesos que forman parte del balance durante un ciclo de cultivo. En este sentido se pueden observar y/o modificar las ecuaciones que intervienen en el balance hídrico. En consecuencia, este modelo podrá servir para aportar nuevas ideas en la conformación de políticas que ayuden a optimizar el rendimiento de dichos cultivos.

En estudios previos se han calculado los balances hídricos para estos agroecosistemas (Sarmiento, 2000; Díaz, 2008), en los cuales se destaca la importancia de la evapotranspiración como un subproceso del balance hídrico, y se sientan las bases para el desarrollo de balances más específicos haciendo uso de la modelización. Así mismo, existe una gran variedad de modelos de simulación de balance hídrico reportados en la literatura, acoplados a plataformas de simulación de modelos de cultivos, de cuencas o de erosión, entre otros. En el capítulo 2 se mostrará con detalle, algunos de los modelos más destacados, los cuales tienen insertado, sus respectivos módulos de balance hídrico. Desacoplarlos de los sistemas en los que se encuentran insertados y evaluar críticamente los diferentes supuestos o submodelos de los componentes del balance hídrico resulta ser una tarea extremadamente difícil, cuando no imposible. Además, intentos previos de usar algunos de estos modelos en los agroecosistemas locales han revelado algunas deficiencias (Sarmiento y Bowen, 2002).

En ese sentido, en esta investigación se plantea, el ensamblaje de una serie de modelos de balance hídrico buscando el mínimo grado de complejidad que permita una buena simulación. Se comenzó con un modelo base constituido por la descripción más elemental de los diferentes subprocesos que conforman dicho balance.

A partir de este modelo base se desarrollaron de forma iterativa modelos de mayor complejidad, siguiendo el principio de la navaja de Ockham, el cual reza que: “En igualdad de condiciones, la explicación más sencilla suele ser la correcta”. De acuerdo con este principio lo que se quiere es reflejar de la forma más adecuada las características particulares del balance hídrico en los agroecosistemas seleccionados, tomando el modelo más sencillo posible.

Todos los modelos desarrollados en este estudio han sido calibrados y validados con data existente de experimentos realizados en las localidades de Gavidia y Mixteque. La bondad de ajuste de los modelos es evaluada estadísticamente utilizando diferentes métricas que se detallarán más adelante. Con estos análisis se han detectado las debilidades en los modelos y en base a ello, se desarrollan los modelos subsiguientes.

Los modelos presentados en esta investigación, tienen la ventaja de proporcionar autonomía para conocer y modificar las ecuaciones, con la finalidad de adaptarlos a las condiciones propias de los agroecosistemas donde son usados o aplicados. Además, dada la importancia del subproceso de evapotranspiración, en este trabajo se hace énfasis en este subproceso, pues su modelización de manera inapropiada, podría causar una descripción errónea de la distribución del contenido de agua en el suelo dentro del balance.

Este trabajo de investigación está estructurado de la siguiente manera:

Capítulo I: Introducción. Presenta el tema de la investigación desarrollada, el planteamiento del problema, los objetivos del estudio, y la justificación del proyecto de investigación.

Capítulo II: Marco Referencial. Detalla los aspectos conceptuales en los que se basa el estudio, incluyendo los antecedentes de algunos modelos de balance hídrico. Además, se describe cada uno de los subprocesos que forman parte del balance hídrico, haciendo un especial énfasis en el subproceso de evapotranspiración. En este estudio se adopta la metodología usada en Allen et al. (1998).

Capítulo III: Marco Metodológico. Describe los aspectos que conforman la investigación, incluyendo los datos recolectados que se disponen para la elaboración de este trabajo. Estos registros fueron recolectados en las localidades de Mixteque y Gavidia en el Municipio Rangel del estado Mérida. Adicionalmente se presenta la descripción de los modelos de balance hídrico en cada uno de los experimentos mencionados, destacando las diferentes ecuaciones en los subprocesos que conforman dicho balance.

Capítulo IV Resultados. En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones en relación a los valores observados, del contenido de agua en el suelo, escorrentía y drenaje, para determinar las posibles fallas o desajustes que puede tener cada modelo y en base a su corrección se presenta el modelo siguiente. Además de mostrar los resultados de las simulaciones de cada uno de los modelos planteados, de forma simultánea muestra las tendencias de los valores reales, contrastando de forma visual los dos comportamientos. Y luego estas dos tendencias (simuladas y datos), son evaluadas con distintas medidas de bondad de ajuste.

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones. Expone las conclusiones finales de acuerdo a los resultados de las simulaciones obtenidos de cada

modelo en sus respectivas modalidades. Finalmente se presentan algunas recomendaciones para ejecutarlas posteriormente en trabajos futuros.

En la elaboración de este trabajo, se presenta un glosario de términos al final del mismo, el cual contiene la definición de los términos técnicos que se encuentran subrayados en el cuerpo del trabajo. Lo cual facilitará una mayor comprensión por parte del lector.

1.1 Planteamiento del Problema

Hasta el día de hoy, son diversos los modelos que se han establecido para el cálculo del balance hídrico. Sin embargo cuando han sido aplicados o adaptados a los agroecosistemas andinos en cultivos de papa, los resultados no han sido los más deseados, puesto que en la mayoría de los casos los métodos utilizados en el modelado de los subprocesos, se encuentran basados en relaciones o métodos empíricos. Adicionalmente, la presentación de los modelos existentes no ofrece la posibilidad de conocer las estructuras de las ecuaciones de sus respectivos procesos, y menos aún de modificarlas, para ajustarlas a las condiciones particulares de un agroecosistema.

Por otro lado, es conveniente recordar, que el subproceso de evapotranspiración representa la unión de tres procesos. El primero de ellos es el de evaporación del suelo, el otro es el de transpiración de las plantas y el tercero se refiere al agua que es interceptada del dosel de las plantas y que se evapora a partir del mismo. La evapotranspiración es considerada como uno de los subprocesos más complejos, debido a que para su cálculo interviene un gran número de variables. Esto ha motivado la necesidad de ensamblar un modelo enfatizado en el subproceso de evapotranspiración, determinado bajo los lineamientos presentados en Allen et al. (1998) y que proporcione una mejor descripción de la distribución del agua en los agroecosistemas andinos en suelos bien drenados, tomando en cuenta las características climáticas y del suelo que en ellos predominan.

Los modelos desarrollados en este trabajo, se han diseñado bajo un ambiente de dinámica de sistemas, con compartimientos y flujos, cuya solución se basa en ecuaciones diferenciales. Es conveniente destacar, que dichos modelos, podrán ser de gran utilidad en diversas aplicaciones en el campo de la agronomía y la ecología.

Esta investigación se ha hecho posible debido a que se cuenta con datos suficientes de dos experimentos realizados respectivamente en las localidades de Mixteque y Gavidia, ubicadas en el municipio Rangel del estado Mérida. En el primero de ellos se tomaron registros diarios climáticos de las siguientes variables: precipitación, radiación, contenido de agua en el suelo, humedad relativa máxima y mínima, temperatura máxima y mínima, y velocidad del viento. Así mismo se tienen de registros de características del suelo como pedregosidad y capacidad de campo, además de registros sobre aplicación de riego. Por otra parte se dispone también de registros de drenaje y escorrentía, que, aunque no son diarios, servirán para dar cuenta del ajuste de los diferentes modelos en cuanto a estos procesos. Los datos antes mencionados, han servido de insumo en la elaboración de la tesis doctoral de Díaz (2008).

En lo que se refiere a la localidad de Gavidia, se tienen registros climáticos diarios de radiación, temperatura máxima y mínima, precipitación, así como también registros no diarios de índice de área foliar, drenaje, escorrentía y agua en el suelo, tomados de la tesis doctoral de Sarmiento (2000).

1.2 *Objetivos del Estudio*

A continuación se proporciona una descripción de los objetivos planteados para el desarrollo de este trabajo, y que han servido de guía para la elaboración de esta investigación.

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar modelos de simulación de balance hídrico, que vayan incorporando de forma progresiva mayor complejidad en el subproceso de evapotranspiración.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Comprender cada uno de los procesos que forman parte del balance hídrico y las posibles formas en que pueden ser modelizados.
- Seleccionar y organizar las bases de datos necesarias para calibrar y validar los modelos.
- Elaborar versiones sucesivas de un modelo de balance hídrico, según las metodologías que rigen el subproceso de evapotranspiración
- Evaluar las diferentes versiones de los modelos a través de pruebas de bondad de ajuste y detectar sus posibles problemas.

1.3 Justificación del Estudio

Como se planteó anteriormente, existen ciertas dificultades en la modelización de balances hídricos para los agroecosistemas locales. Estas dificultades tienen que ver básicamente con dos aspectos. Por un lado, experiencias pasadas en el uso de modelos generales de sistemas agrícolas han revelado deficiencias en los submodelos utilizados para varios componentes del balance hídrico. Ver Sarmiento y Bowen (2002). Además, debido al tipo de interfaz de estos modelos, no es posible cambiar la manera de modelizar los submodelos problemáticos o ensayar diferentes formulaciones de los procesos.

Uno de los componentes que sería conveniente modelizar más adecuadamente es la evapotranspiración que es un proceso complejo y de gran importancia para estos sistemas.

Es así como en este trabajo se plantea la realización de una serie de modelos modulares y desarrollados paso a paso que permitan tener más control sobre la formulación matemática del balance hídrico con especial énfasis en la evapotranspiración. Esto permitirá adaptar más fácilmente el modelo a las situaciones locales particulares haciendo posible un balance dinámico detallado del agua en el suelo.

Finalmente, es importante señalar que estos modelos constituyen una herramienta que proporcionan una descripción en detalle de los subprocesos que constituyen el balance hídrico, durante el ciclo de los cultivos de papa. Por tanto son de gran utilidad para diseñar mejores prácticas de manejo del agua durante el ciclo de crecimiento, lo cual puede servir para incrementar el rendimiento de las cosechas en los agroecosistemas andinos.

1.4 Metodología Aplicada

La metodología empleada para la elaboración de este proyecto sigue los planteamientos generales de Haefner (2005), constituyendo una alternativa a la visión clásica del modelado. Este planteamiento se encuentra basado en la formulación de una serie de hipótesis alternativas de manera conjunta con los modelos que las originan, y luego se prueban los modelos de forma independiente. Esta metodología se puede resumir en las siguientes etapas:

1. Estudio del sistema del balance hídrico del agroecosistema, para poder tener conocimiento de todos los aspectos involucrados en dicho balance, para ello se realizó una revisión bibliográfica acerca de los diversos aspectos del balance hídrico y adicionalmente de los modelos desarrollados hasta los momentos. Con esto se busca dar una descripción detallada de todas las variables que se involucran en el sistema.

2. Se establecen los diferentes grupos de hipótesis, estas hipótesis son formuladas en función a los objetivos que se persiguen en la simulación.
3. Con cada grupo de hipótesis y los conocimientos previos obtenidos en el primer paso, se empiezan a implementar los respectivos modelos por cada conjunto de hipótesis elaboradas, para ello se necesita toda la información acerca de los procesos que intervienen en el balance hídrico, para que se puedan establecer las formulaciones matemáticas con las que se modelará cada subproceso de dicho balance.
4. Luego que los modelos se encuentran desarrollados se procede a su respectiva verificación revisando que las ecuaciones planteadas representen de forma correcta las distintas relaciones establecidas para todas las variables y subprocesos.
5. Una vez que los modelos han sido implementados se procede a calibrar algunas constantes y/o variables para que de esta manera se puedan producir las salidas del modelo lo más cercano a los valores reales de los cuales se disponen.
6. Por último cuando el modelo ha sido implementado, verificado, y calibrado se procede a realizar las corridas de cada modelo, las cuales permitirán evaluar los resultados que son comparados de forma independiente de acuerdo a diversos criterios. En este trabajo el criterio que se busca es el de la simplicidad denominado el de la navaja de Ockham, con lo que se quiere es representar un modelo de balance hídrico de la forma más sencilla posible.
7. Este último paso dará a conocer cuál fue el mejor modelo y éste modelo sugerirá nuevas recomendaciones para ser aplicadas posteriormente.

En la figura 1.1 se puede observar un esquema de la metodología empleada en este proyecto.

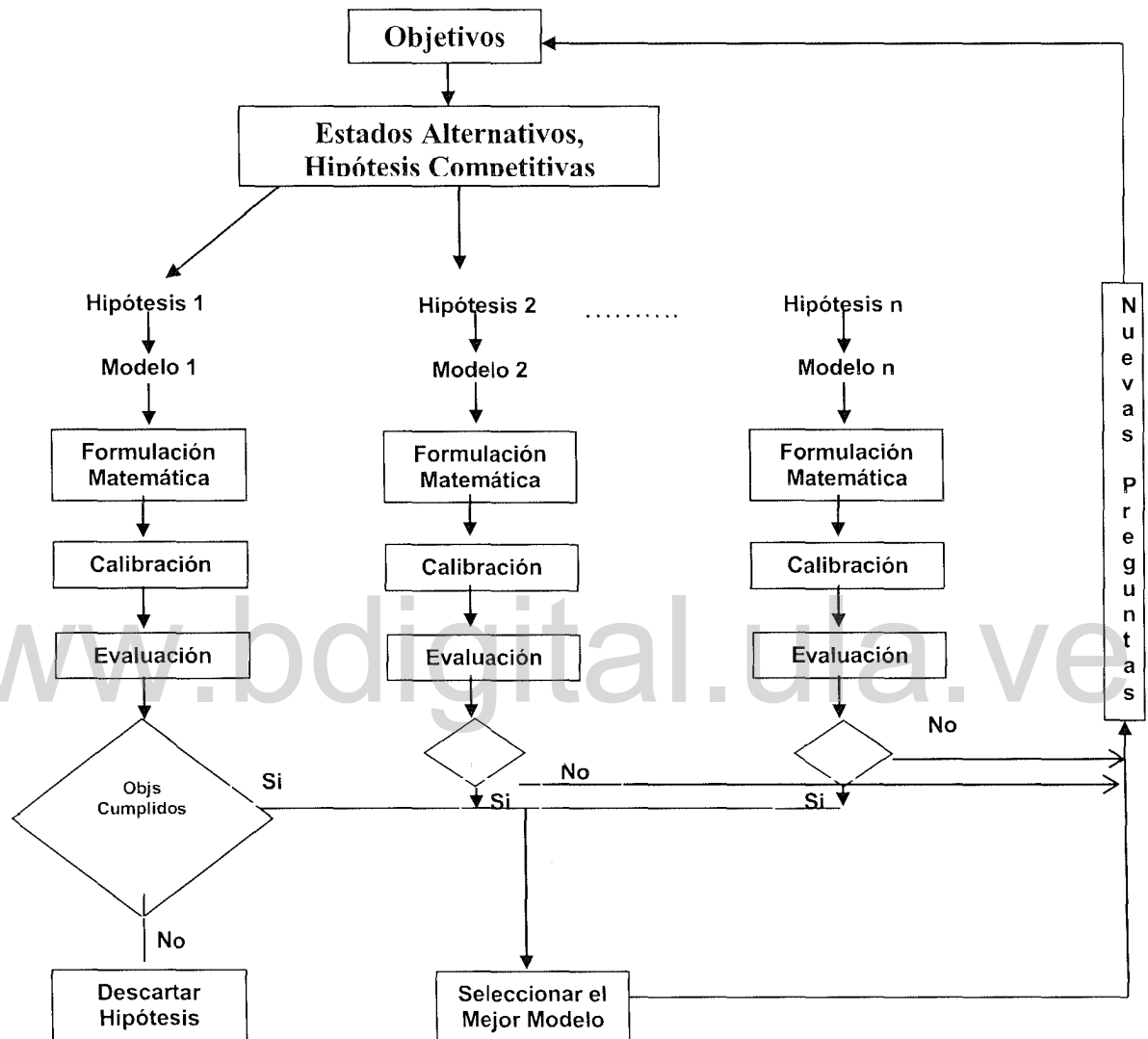


Figura 1. 1 Esquema General de la Metodología Aplicada.
Fuente: Haefner (2005).

1.5. Antecedentes

Hasta los momentos han sido varios los modelos de balance hídrico que han sido desarrollados a nivel mundial, para describir el paso del agua tomando en cuenta la estructura del suelo. A continuación se mencionan los más resaltantes, con algunas de sus características más importantes en función a los subprocesos que involucran el balance hídrico, destacando que se hará uso de algunos conceptos que serán explicados con detalle en el capítulo II:

CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosión from agricultural Management Systems* (Knisel 1980): fue diseñado para evaluar la contaminación de origen no puntual en unidades hidrológicas del tamaño de campos de cultivo (Bingner, 1990) citado por Silva (1995), y se aplica en la simulación de la calidad del agua en esa escala (1 a 100 ha) Silva (1995). Aunque el fin principal de este modelo fue el de estimar la erosión del suelo, tiene una serie de submodelos los cuales simulan algunos de los procesos del balance hídrico como: escorrentía, y evapotranspiración.

Este modelo simula la escorrentía a través del método de la curva numérica, pero también tiene la característica de poder introducir estos datos de escorrentía como parámetro de entrada, en el caso de que se tengan mediciones de los mismos.

Según Acevedo (2004), el método de la curva numérica es una aproximación empírica que permite calcular cuanta escorrentía se produce por la lluvia. Esto lo realiza a través de la ecuación 2.1

$$Q = \frac{(R - 0.2s)^2}{R + 0.8s} \quad \text{Ec. 1. 1}$$

Donde:

(Q): Nivel de Escorrentía (mm)

R: es la precipitación (mm)

s : Potencial máximo de retención de humedad del suelo después del comienzo de la escorrentía (mm)

$$s = 254 \left(\frac{100}{c} - 1 \right) \quad \text{Ec. 1. 2}$$

Como se observa para el cálculo del potencial máximo de retención de humedad del suelo (s), se necesita determinar el valor del parámetro (c), el cual es un coeficiente que se selecciona de manera empírica y oscila entre (0 y 100). El mismo, trata de capturar las características del cultivo como cobertura del suelo, y a su vez toma en cuenta las características del suelo. De manera que números bajos de (c) en el rango indicado anteriormente, indican un suelo más permeable en consecuencia un menor potencial de escorrentía, y números altos indican suelo menos permeable por lo que reflejan un alto potencial de escorrentía. En la Figura 1.2 se observa el comportamiento del potencial máximo de retención de humedad del suelo (s), en función del número de la curva (c) determinándose una relación inversa entre estas dos variables.

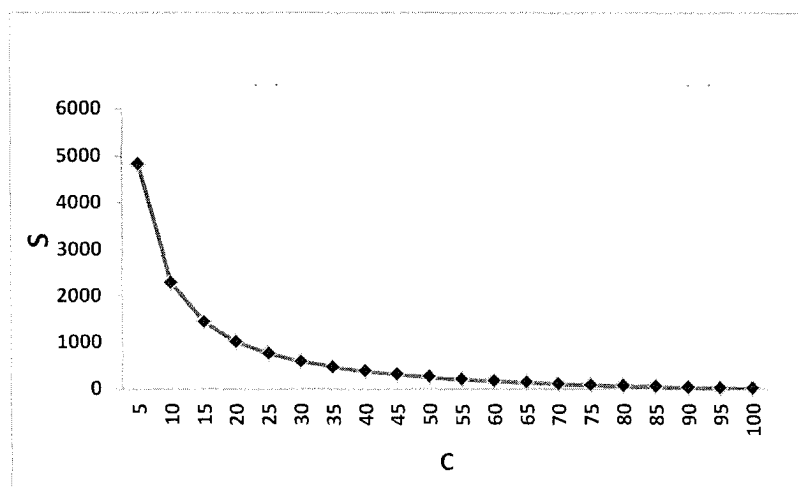


Figura 1. 2 Valores de Potencial Máximo de retención de Humedad.

Fuente: Acevedo (2004).

La tasa de escorrentía (Q) queda determinada por la ecuación 1, con la siguiente excepción, si la precipitación es menor que el valor 0,2s entonces la escorrentía es cero.

En lo que se refiere al subproceso de evapotranspiración, en este modelo (*CREAMS*), se calcula a través del método de Ritchie, el cual estima por separado los procesos de evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. La evaporación en el método de Ritchie (Klocke, et al. 1996) considera que ésta ocurre en dos etapas, la primera de ellas es cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda, la tasa de evaporación potencial (término que se explica con más detalle más adelante), es limitada por la energía disponible en la superficie y se determina mediante la siguiente expresión:

$$EOS = EO(1 - 0.43LAI) ; \text{Si } LAI < 1 \quad \text{Ec. 1. 3}$$

$$EOS = EO * \text{EXP}(-0.39LAI + 0.1438); \text{Si } LAI > 1. \quad \text{Ec. 1. 4}$$

Dónde:

EO se refiere a la Evapotranspiración para un cultivo de referencia (mm).

LAI : Índice de Área Foliar (Adimensional).

La segunda etapa del proceso de evaporación en el método de Ritchie, (Klocke et al. 1996) ocurre cuando el suelo se encuentra seco, entonces la evaporación se calcula en función de la textura del suelo, y se muestra en la ecuación 1.5

$$ES = CT^{\left(\frac{1}{2}\right)} \quad \text{Ec. 1. 5}$$

Donde:

C : Constante empírica que refleja la contextura del suelo (adimensional).

T : Tiempo en el cual comienza la evaporación real del suelo.(día)

Respecto a la transpiración en el método de Ritchie, Klocke, et al. (1996) hace mención de otra relación empírica para calcularla pero independientemente del suelo, llegando a la siguiente expresión:

$$EP = EO \left[-0.21 + 0.70(LAI)^{\frac{1}{2}} \right] \quad \text{para } 0.1 < LAI < 3.0 \quad \text{Ec. 1. 6}$$

Cuando el índice del área foliar (LAI) excede de 3 la transpiración es igual a la evaporación potencial.

DDSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*)

Este software surge a través del proyecto IBSNAT (*International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer*), el cual es un proyecto internacional con sede en la Universidad de Hawaii, cuyo objetivo principal fue el de crear un sistema que permitiera colaborar en la toma de decisiones y en la transferencia de tecnología agropecuaria. DSSAT es un software que combina bases de datos de cultivos, suelos y clima en formatos estándares. El usuario puede de realizar simulaciones multianuales para diferentes estrategias de manejo de cultivo de cualquier parte del mundo. DSSAT también proporciona una herramienta que facilita la validación de los resultados comparándolos con resultados observados. Este software contiene 28 submodelos de simulación de cultivos, respaldado por una base de datos de programas de manejo de suelo, clima, manejo de cultivos, y datos experimentales.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial usa los métodos de Priestley-Taylor y el de Penman-Monteith FAO este último será desarrollado con detalle posteriormente.

El método de Priestley-Taylor, puede ser considerado como una simplificación del método de Penman, en el cual sólo se requiere de la información de la radiación solar y de temperatura, para ser calculado.

Para ello se determina primero la radiación solar neta:

$$\partial(T): \left[21.3 - \frac{5304}{T+273} \right] \left[\frac{5304}{(T+273)^2} \right] \quad \text{Ec. 1. 7}$$

Donde:

$\partial(T)$: Pendiente de la presión de vapor (KPa).

T : Temperatura. °K

La evapotranspiración por el método de Priestley-Taylor queda determinada por la siguiente ecuación:

$$\text{ETP} = 30.6 \left(\frac{2\pi}{365} Q(1 - \alpha) \right) \left(\frac{\partial(T)}{\partial(T)+\gamma} \right). \quad \text{Ec. 1. 8}$$

Donde:

ETP : Evapotranspiración Potencial (mm).

Q : Radiación Solar. $MJm^{-2}dia^{-1}$

α : Albedo de la superficie. (Adimensional)

γ : Constante Psicrométrica. $\gamma = 6.6 \times 10^{-3} \text{ kPa } ^\circ C^{-1}$

P : Presión Atmosférica. kPa

Acevedo (2004).

CROPSYS (*Cropping Systems Simulation Model*) Simula diferentes cultivos extensivos (aquellos obtenidos sólo con recursos de la naturaleza, en este tipo de cultivos no se aplican ningún elemento químico para su reproducción) durante varios años de forma diaria, incluye el balance y absorción de nitrógeno y agua en el suelo, infiltración, crecimiento y desarrollo del área foliar, producción de biomasa y el rendimiento final del cultivo, así como la descomposición de los residuos del cultivo y la erosión del suelo. Simula además opciones de manejo del cultivo tales como: Riego, fertilización, entre otros Milera, y Crotti (2005).

Este modelo toma en cuenta diversos procesos que forman parte del balance hídrico del suelo, entre ellos se encuentran: riego, precipitación, lluvia interceptada por el cultivo, la escorrentía superficial, y la evapotranspiración potencial; los cuales se explican a continuación:

Riego y precipitación : En este caso el modelo permite definir la cantidad de riego y los tiempos en la cual se quiere modelar el riego, todo esto lo hace a través de la activación de un comando que se encuentra definido en las opciones de modelo, de acuerdo al interés del investigador. Respecto a la precipitación, esta es derivada u obtenida de datos climáticos.

Intercepción: Este modelo asume que la cantidad de agua interceptada se encuentra en función de la cobertura del dosel (*FracCob_dosel*) y se determina mediante

$$I = 0.001 \times \text{FracCob_Dosel} \quad \text{Ec. 1.9}$$

(Campbell et al. 1988).

Escorrentía: El sub proceso de escorrentía es simulado por el método de la curva numérica descrito anteriormente en el modelo de balance hídrico CREAMS.

Evapotranspiración potencial:

Toma en cuenta los siguientes métodos: Priestley-Taylor y Penman-Monteith, tal y como el modelo anterior.

SAHEL (*Soil in Semid Arids Habitats that Easily Leach*)

El modelo SAHEL (*Soils in semi-Arid Habitats that Easily Leach*) fue desarrollado por Penning de Vries et al. (1989) y posteriormente implementado

en la herramienta de dinámica de sistemas Vensim® por Metselaar, (2003), en el marco del Proyecto *TROPANDES*.

Es un modelo de balance hídrico, el perfil del suelo se divide en capas, cada una con espesores y características de retención de agua distintas, incluyendo una capa superior de hojarasca. El espesor de la hojarasca y las características físicas de cada capa, son información de entrada al modelo, además de datos climáticos como temperatura y precipitación. La entrada y salida de agua de cada capa se simula a nivel diario. La capacidad de campo es el parámetro que determina el mayor contenido de agua que puede tener una capa y aquella que exceda este límite drena a la siguiente capa o sale por drenaje desde la última capa hacia fuera del perfil (Penning de Vries et al. 1989). Las ecuaciones del balance hídrico de este modelo, serán desarrolladas en detalle más adelante, ya que las mismas serán parte del modelo base que se construirá como parte de este estudio.

SWAT (*Soil and water Assessment Tool*)

SWAT fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos convirtiéndose en una prominente herramienta en todo el mundo para los estudios referidos al uso de la tierra, cambios climáticos, balance hídrico, y la calidad del agua entre otros. (Watson et al. 2003). Este modelo se diseñó para ser aplicado en cuencas hidrográficas, desde cientos de hectáreas a miles de kilómetros cuadrados, con fines de evaluar el efecto del uso y manejo de la tierra sobre la calidad y régimen de la producción de agua y sedimento (Silva, 2004).

En los procesos que involucran al balance hídrico, en lo que se refiere a la infiltración utiliza el método de la curva numérica y en la evapotranspiración utiliza el método de Penman Monteith, Priestley-Taylor, y el de Hargreaves.

Este último ha sido desarrollado como un método alternativo para calcular la evapotranspiración con la siguiente expresión:

$$ET_o = 0.0023(T_{prom} + 17.8)(T_{Max} - T_{Min})^{0.5}R_a \quad \text{Ec. 1. 10}$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia (mm).

T_{prom} : Temperatura promedio ($^{\circ}C$).

T_{Max} : Temperatura máxima ($^{\circ}C$)

T_{Min} : Temperatura mínima. ($^{\circ}C$)

R_a : Radiación solar extraterrestre $MJm^{-2}dia^{-1}$

Cabe destacar que este método tiene la tendencia de subestimar la evapotranspiración bajo condiciones de vientos fuertes es decir, cuando la velocidad del viento es mayor a 3 m/s, y a su vez tiende a sobreestimar la evapotranspiración cuando se tiene una alta humedad relativa (Allen et al. 1998).

EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*)

Fue desarrollado para determinar la relación entre la erosión del suelo y su productividad. Toma en cuenta la planificación para establecer las metas de control de la erosión en función de las técnicas de conservación y productividad actuales de los cultivos, los estimados de costos y la relación entre costos y productividad pueden orientar a las inversiones en preservación del suelo (Benson *et al.* 1989, citado por Silva 1995). Sus principales componentes son hidrología, clima, erosión, nutrientes, crecimiento de las plantas, temperatura del suelo, labranza, factores económicos y manejo del cultivo (Silva, 1995).

Para el cálculo de la evapotranspiración, este modelo considera por separado los dos subprocesos, la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas.

La evaporación del suelo se calcula mediante:

$$EOS = EO(EA) \quad \text{Ec. 1. 11}$$

Donde:

EO : Evapotranspiración de cultivo de referencia (mm)

EA : Índice de cobertura de la superficie.

$$EA = \exp(-0.1 * CV). \quad \text{Ec. 1. 12}$$

CV : suma de la biomasa y de los residuos de cultivos sobre la superficie del suelo.

Y el proceso de transpiración se calcula mediante:

$$EP = (EO * LAI)/3 \quad \text{para } LAI < 3. \quad \text{Ec. 1. 13}$$

$$EP = EO \quad \text{para } LAI > 3 \quad \text{Ec. 1. 14}$$

Esta última relación, indica que la transpiración de las plantas es igual a la evapotranspiración cuando el índice de área foliar excede a 3, es decir que en este caso la evaporación directa del suelo es igual a cero.

SWRRB (*Simulator on Water Resources in Rural Basins*)

Este modelo predice el efecto de las decisiones de manejo sobre la producción de agua y sedimentos en cuencas sin registros. No requiere calibración ya que las entradas del modelo están basadas en procesos físicos. Los tres mayores componentes del SWRRB son clima, hidrología y sedimentación (Silva 1995).

Una vez presentado los fundamentos y las inquietudes que dan origen a esta investigación, incluyendo la metodología que se implementará en el desarrollo de este proyecto y los antecedentes de trabajos que se han desarrollado, el capítulo II presentará los aspectos conceptuales involucrados en este trabajo de investigación.

2. Capítulo II: Marco Referencial

Para una mejor comprensión de este proyecto, en este capítulo se desarrollarán las bases teóricas de los diversos aspectos que son necesarios para llevar a cabo esta investigación.

2.1. *Modelado y Simulación Ambiental*

Desde 1950, la simulación ha crecido significativamente como una actividad de investigación, reflejando desarrollos conceptuales en las mismas técnicas de simulación, desde el enfoque tecnológico, informático, y científico entre otros, todo esto en respuesta a la necesidad de abordar el estudio de los sistemas de una forma integral y el incremento en la demanda para la extrapolación (especialmente predicción) en el espacio y el tiempo. La simulación se ha convertido en una de las más poderosas herramientas en el entorno de las ciencias ambientales, la cual ha servido para alimentar una mejor comprensión de las interacciones entre el ambiente, ecosistemas y las poblaciones de humanos y otros animales. Wainwright y. Mulligan (2004).

2.2. *Dinámica de Sistemas*

La dinámica de sistemas es una metodología que ayuda a mejorar el aprendizaje de sistemas que se encuentran conformados por estructuras que no son fáciles de comprender, es decir, de sistemas complejos. Aportando así, la comprensión de las posibles fuentes que originan los cambios en dicho sistema, y en consecuencia, permite determinar a futuro los lineamientos que conlleven a las soluciones más efectivas y más eficaces de los problemas que aquejan a estos sistemas. Más formalmente, se define un sistema como todo objeto dotado de alguna complejidad formado por partes coordinadas, de modo

que el conjunto constituido por todas sus partes posea una cierta unidad, que es precisamente el sistema (Aracil, 1995).

La dinámica de sistemas tiene una gran variedad de aplicaciones, sobre todo en el desarrollo e implementación de sistemas computacionales, ya que lo que busca esta técnica es representar mediante expresiones matemáticas, las distintas relaciones que se establecen en la descripción verbal o modelo mental de lo que sucede en un sistema o modelo. Respecto a este último se puede definir como una representación simplificada de la realidad, que se encuentra basada en conceptos, hipótesis y teorías, que reflejan las formas de comportamiento real del sistema al cual representan (Acevedo, 2004).

El origen de la dinámica de sistema se remonta al área de sistemas dinámicos originados en la década de los 60 con el trabajo de Jay Forrester y sus colegas del Sloan School of Management en el Instituto de Tecnología de Massachussetts donde desarrollaron las ideas iniciales para la aplicación de conceptos de la teoría de control de regeneración, al estudio de sistemas industriales (Ford, 1999).

Es importante señalar que en el desarrollo de los problemas de dinámica de sistemas se tiene que tener presente el horizonte, el cual se refiere al tiempo en el que se va a desarrollar el estudio. Este debe abarcar lo suficiente en el pasado como para mostrar donde se originó el problema y también debería extenderse lo necesario en el futuro para que así pueda capturar los efectos indirectos propiciados por las políticas ensayadas.

En la actualidad se disponen de dos herramientas para la construcción de modelos bajo la concepción de dinámica de sistemas, las mismas son: los diagramas lazo causal y los diagramas de compartimientos y flujos.

Los diagramas lazo causal o lazo de retroalimentación son una herramienta importante para representar las estructuras de realimentación de los sistemas. En la construcción de estos diagramas, las variables se encuentran conectadas por flechas las cuales hacen referencia a las relaciones causales entre ellas. Estas flechas a su vez, se encuentran marcadas por una polaridad que puede ser positiva o negativa, las cuales reflejan cómo cambia la variable dependiente en función a la variable independiente (Ver Figura 2.1).

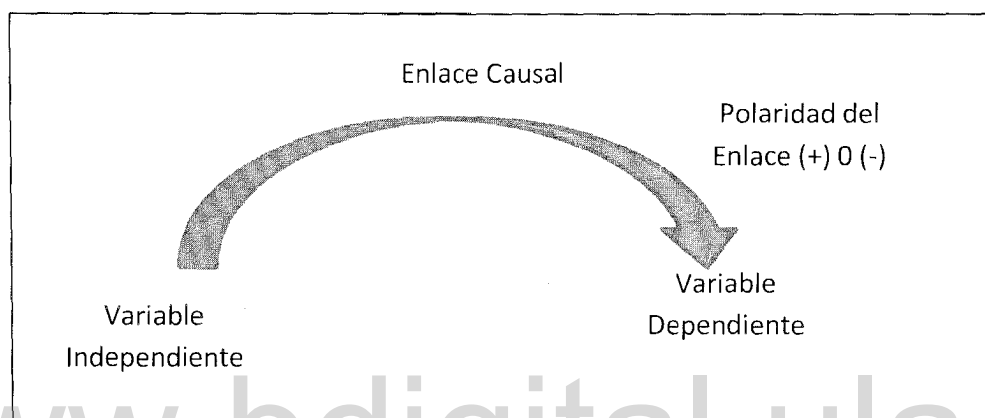


Figura 2. 1 Diagrama de Lazos y Causal.

Fuente Stearman (2000).

Otro aspecto a destacar en estos diagrama de Lazo Causal, son las polaridades, que a su vez pueden ser de dos tipos: positiva y negativa. La primera refleja una relación directa entre la variable dependiente e independiente, es decir que en la medida que una aumenta la otra también aumenta y si una disminuye la otra también disminuye. Este tipo de lazos representa un reforzamiento en el proceso que se encuentra representando. Por otro lado, una polaridad negativa refleja una relación inversa entre las mencionadas variables, es decir, que en la medida que una variable aumenta, la otra disminuye, en este caso este tipo de lazos contrarrestan y se oponen al cambio dentro del proceso representado. Para determinar si un lazo es positivo o negativo basta con contar el número de lazos negativos dentro del lazo. Si el número de lazos negativos es par, entonces el lazo es positivo, si por el contrario, el número de lazo es impar entonces, el lazo es negativo. En la

Figura 2.2 se puede observar gráficamente los ejemplos de los tipos de lazos mencionados.

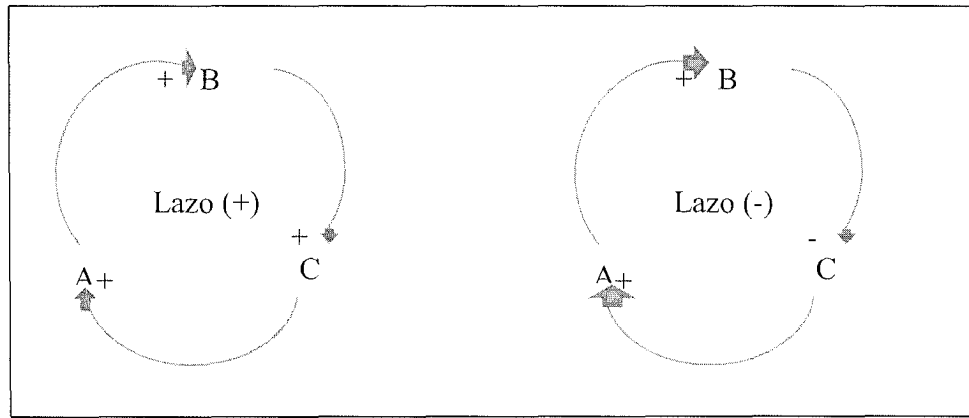


Figura 2. 2 Diagrama de retroalimentación Positiva y Negativa.

Fuente Stearman (2000).

Otra herramienta muy utilizada en la dinámica de sistemas se refiere a los diagramas de compartimientos y flujos. En este tipo de diagrama, las variables son identificadas de acuerdo a su representación dentro del sistema, clasificándose en los siguientes tipos:

Nivel: Son las que determinan la situación en la que se encuentra el sistema en un momento determinado. Llamadas también variables de estado, representan la acumulación en el tiempo de acuerdo a una magnitud. Son llamadas también reservorio o compartimiento.

Flujo: son las que ejercen influencia sobre las variables de nivel, éstos flujos a su vez pueden ser flujos de entrada o flujos de salida, y pueden a su vez estar influenciados por otras variables auxiliares.

Auxiliares: Son variables dependientes intermedias que reciben información de otras variables que transforman en nueva información en base a una función determinada y cuya salida se dirige hacia otra variable auxiliar o hacia una variable de flujo. Se utilizan para descomponer ecuaciones complejas en ecuaciones más simples que faciliten la lectura del modelo.

Nubes: Representan las fuentes o sumideros de los flujos. Una fuente representa el nivel fuera de las fronteras del modelo donde se origina el flujo. Los sumideros representan los niveles hacia los cuales se desplazan los flujos dejando las fronteras del modelo.

Un aspecto importante de destacar en la dinámica de sistemas, se encuentra en la definición de las Variables Exógenas, que son aquellas variables que afectan al sistema pero que no es afectada por ninguna otra variable del sistema. (Aracil, 1995). En este trabajo las variables exógenas son todas aquellas que sirven como insumo para calcular parte de los subprocesos que forman parte del balance hídrico, y que serán explicados con mayor detalle más adelante.

En la Figura 2.3 se pueden observar las formas gráficas de cada uno de los tipos de variables que se encuentran en un diagrama de compartimientos y flujos. Adicionalmente en la Figura 2.4 se muestra la estructura general de un diagrama de este tipo.

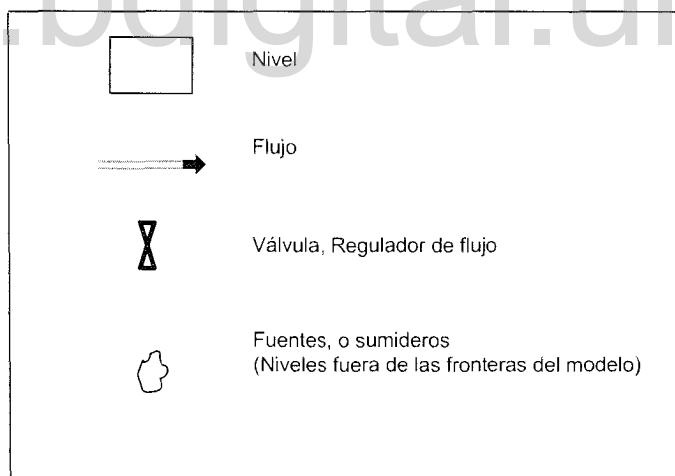


Figura 2. 3 Elementos de un Diagrama de Compartimientos y Flujos.

Fuente Stearman (2000).

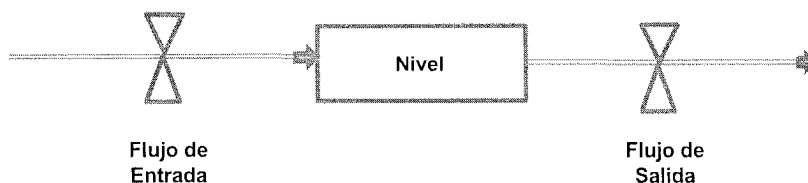


Figura 2. 4 Estructura General de un Diagrama de Compartimientos y Flujos.

Fuente: Stearman (2000).

En los diagramas de compartimientos y flujos, las relaciones de influencia que existen dentro de los lazos de retroalimentación se encuentran determinadas por la asignación de un signo. Estas relaciones pueden manifestarse de forma instantánea o pueden tardar tiempo en manifestarse, este último tipo de relación se encuentra asociada con retardos, influyendo de esta manera con el comportamiento del sistema. Por otro lado, cuando se tiene un lazo de realimentación positiva y éste a su vez posee un retardo, tiene como consecuencia, que el crecimiento no se produzca de forma tan rápida, y en el caso de que el diagrama de realimentación sea negativo y éste tenga asociado un retardo tiene como consecuencia que el comportamiento del sistema sea más notorio.

Por otro lado, existen diversas formas de comportamiento de las variables que se modelan, entre los cuales podemos mencionar: crecimiento exponencial, búsqueda del objetivo y la oscilación. El crecimiento exponencial surge de la retroalimentación positiva, búsqueda del objetivo de la retroalimentación negativa, y la oscilación surge de retroalimentación negativa con retardos. Otras formas de comportamiento son crecimiento en forma de S, sobredisparo, colapso y crecimiento con sobredisparo. Todas estas se pueden apreciar en la Figura 2.5.

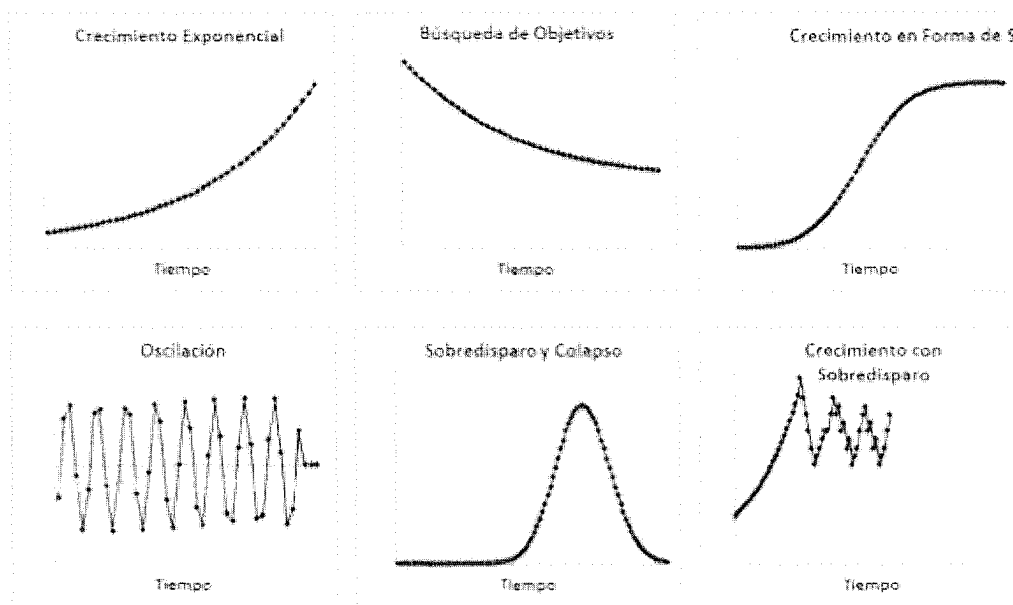


Figura 2. 5 Tipos de comportamiento en la dinámica de sistemas.

Fuente Stearman (2000).

En la actualidad existen diversos softwares para la aplicación y desarrollo de modelos en dinámica de sistemas. En este estudio los modelos que se presentan se encuentran elaborados bajo la plataforma de simulación Vensim Profesional, el cual es una herramienta visual de modelización que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de dinámica de sistemas.

2.3. *Proceso del Modelado*

La construcción de un modelo es un proceso iterativo de ensayo y error. Usualmente un modelo se construye en pasos incrementando su complejidad hasta que es capaz de replicar la conducta observada del sistema de forma aceptable o adecuada. Entonces este modelo es usado para explorar como la conducta simulada puede ser mejorada por cambios en las políticas de las variables (Ford 1999). Aunque dentro del proceso de modelado no existe un

método exclusivo de pasos a seguir, se hace necesario poder contar con los conocimientos y las opiniones de aquellas personas que hacen uso del mismo, con el fin de poder captar los niveles de detalle de los procesos que forman parte del sistema que se quiere modelar. En ese sentido Stearman (2000), hace mención de algunas recomendaciones a tener en cuenta dentro del proceso de modelado:

1. Articulación del Problema

Este paso inicial, es, si se quiere uno de los más importantes dentro del proceso del modelado, ya que se tiene que definir o responder preguntas tales como: ¿Cuál es el problema? y ¿Por qué es un problema? Proporcionando estas preguntas una gran ayuda para esclarecer la verdadera utilidad del modelo, ya que determinan el propósito del mismo. Dentro de la articulación del problema, es importante también definir cuáles son las variables claves, de manera conjunta con los conceptos que deberían ser considerados para la construcción del modelo, así como también es importante definir el tiempo en el cuál será implementado, es decir, hay que tener claro, qué tan lejos debería llegar el modelo en la simulación, y qué tan lejos del pasado se encuentra el origen del problema para la simulación del proceso. Para luego, y como último paso, tomar en cuenta el comportamiento de las variables claves durante el proceso de la simulación y como puede ser su comportamiento en el futuro.

2. Formulación de Hipótesis Dinámicas

Luego de tener definido de forma clara el problema, se procede a la formulación de las hipótesis iniciales, las cuales reflejan el comportamiento teórico del sistema a ser modelado, luego se formulan las hipótesis dinámicas, estas hipótesis reflejan el comportamiento del sistema cuando son influenciadas por una estructura de retroalimentación, procediendo luego al mapeo, que consiste en desarrollar la estructura basada en las hipótesis iniciales y las variables claves usando las herramientas disponibles, dentro de las cuales se

puede destacar los diagramas causales y el diagrama de compartimientos y flujos.

3. Formulación de un Modelo de Simulación

En la formalización del modelo, se hace necesario haber definido la especificación de las estructuras que intervienen en el sistema, así como las reglas de decisión que se desarrollan en los distintos sub procesos, para luego realizar la estimación de los parámetros y establecer las condiciones iniciales, una vez desarrollado lo anterior se evalúa la consistencia del modelo de acuerdo a los propósitos establecidos. Esta etapa de formalización puede ser de gran ayuda, ya que se puede esclarecer conceptos de procesos que no hayan sido bien documentados o contradicciones que no han podido ser bien discutidas durante la fase conceptual.

4. Pruebas o validación

Consiste en la comparación de los resultados que arroja el modelo con los datos disponibles que se obtengan del sistema que se quiere simular, en otras palabras, comparar valores simulados con los valores medidos. Otro aspecto importante en las pruebas es la evaluación del modelo para verificar si se comporta de acorde con la realidad cuando es sometido a condiciones extremas, en otras palabras, verificar cómo funciona el modelo cuando es sometido a valores extremos en los valores de sus parámetros.

5. Diseño de Políticas y Evaluación

Se refiere a la especificación de los escenarios o condiciones ambientales que el modelo pudiese enfrentar o ser sometido, en base a posibles condiciones que pudiesen presentarse en el mundo real. A su vez se evalúan dichos escenarios para verificar que tan robusto es el modelo, en el sentido del impacto que tienen los escenarios establecidos previamente en las variables que intervienen en el modelo.

2.3.1. Clasificación de los Modelos:

Los modelos se pueden clasificar según su estructura, objetivo y por su grado de complejidad. Una clasificación posible es la propuesta por Conolly (1998), según la cual los modelos pueden ser:

Determinísticos: Provee resultados dado un conjunto de parámetros. Cada vez que se ejecuta el modelo bajo las mismas condiciones, los resultados serán los mismos.

Estocásticos: Incorporan componentes aleatorios basados en distribuciones de probabilidad por lo que sus resultados de las variables de interés se encuentran en un intervalo de valores posibles.

Funcionales o estadísticos: Utilizan funciones para representar los procesos, con la particularidad de que dichas funciones son empíricas o simplificadas. En consecuencia estas representaciones en diversos casos no son lo más certeras al proceso.

Mecanicistas: Utilizan funciones que describen de forma detallada los procesos físicos que se quieren representar, generalmente con un nivel de detalle de mayor complejidad que los modelos funcionales.

Debido a las características de los modelos de balance hídrico que se presentan en este estudio, cuyas entradas son fijas y determinísticas, estos se pueden clasificar como modelos determinísticos. Por otro lado, ya que la construcción de estos modelos se realiza a través de un compendio de ecuaciones no empíricas que representan una serie de subprocesos físicos, se puede decir que los modelos en este estudio son modelos predominantemente mecanicistas.

2.3.2. Calibración y Validación de Modelos

Calibración o Parametrización

Consiste en asignar valores a los parámetros del modelo. Se puede realizar acudiendo a la bibliografía o mediante un procedimiento que busca encontrar la mejor concordancia entre los valores simulados y los datos. Esto último se puede llevar a cabo por ensayo y error o por el uso del softwares desarrollados para tal fin. (Jorgensen y Bendoricchio, 2001).

Validación.

Consiste en un test objetivo que mide el ajuste de las salidas del modelo y los datos del sistema real. Se puede distinguir entre validación estructural (cualitativa) y validación predictiva (cuantitativa). Un modelo se dice que es estructuralmente válido si las estructuras del modelo representan razonable y certeramente las relaciones causa efecto del sistema real. El modelo se considera estructuralmente válido, si las predicciones de la conducta del sistema son razonables en concordancia con las observaciones del sistema real. (Jorgensen y Bendoricchio, 2001)

2.3.3. Pruebas de bondad de ajuste

Estas pruebas permiten conocer que tan bien logra el modelo simular el comportamiento observado del sistema utilizando índices que contrastan estadísticamente los valores simulados con los valores reales del sistema. Para dar una breve explicación de cada uno de ellos, considérese:

M_i : Salidas o resultados del modelo.

O_i : Valores observados del sistema.

$\bar{M}_i$: Promedio de las salidas del modelo.

$\bar{O}_i$: Promedio de los valores observados del sistema.

N : Número de observaciones.

Los indicadores o índices que se consideran en este trabajo son los siguientes:

Porcentaje del Error Cuadrático Medio (%ECM)

Este coeficiente es una medida de bondad de ajuste relativa que expresa la diferencia porcentual entre los datos o valores observados y los valores simulados o salidas. Por esta razón, mientras más cerca se encuentre de cero mejor será el ajuste del modelo. Su ecuación está dada por:

$$\%ECM = \sqrt{\frac{\sum (O_i - M_i)^2}{N}} \cdot \frac{1}{\bar{O}_i} * (100) \quad \text{Ec. 2. 1}$$

La tabla 2.1 proporciona los criterios de valoración del Porcentaje del Error Cuadrático Medio según sus valores.

Tabla 2. 1.Valores referenciales del Porcentaje del Error Cuadrático Medio	
Valor	Categoría
< 10%	Excelente
10% - 20%	Bueno
20% - 30%	Regular
> 30%	Malo

Fuente: Jamieson et al. (1991)

Error absoluto medio

Esta medida es similar a la anterior sólo que se expresa el error en las unidades en la cual se encuentran medidas las variables, elevadas al cuadrado.

$$MAE = \frac{\sum (O_i - M_i)^2}{N} \quad \text{Ec. 2. 2}$$

Coefficiente de Determinación r^2

El coeficiente de determinación mide si ambas variables se comportan igual, aumentando o disminuyendo de la misma forma. Este coeficiente tiene un rango que se encuentra entre 0 y 1 por lo que: un coeficiente de determinación cercano a cero (0) implica que el modelo o su ajuste a la serie de datos no es la más adecuada y un coeficiente de determinación cercano a uno (1) implica que el ajuste del modelo es bueno respecto a la serie de datos, su cálculo está dado de la siguiente manera:

$$r^2 = \frac{Cov(O_i; M_i)}{Var(O_i)Var(M_i)} \quad \text{Ec. 2. 3}$$

Donde:

$Cov(O_i, M_i)$: Covarianza entre los valores observados del sistema y las salidas o resultados del modelo.

$Var(O_i,)$: Varianza de los valores observados del sistema,

$Var(M_i,)$: Varianza de los valores simulados o salidas del modelo.

Error Cuadrático Medio de las Predicciones MSEP:

Es una medida de bondad de ajuste absoluta, interpretada como un índice de calidad del modelo, el cual se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\text{MSEP} = \frac{1}{n}(\sum O_i - M_i)^2 = (\bar{O}_i - \bar{M}_i)^2 + (S_O - S_M)^2 + 2 * (1 - r^2) S_O^2 S_M^2$$

Ec. 2. 4

Donde:

r : Coeficiente de Correlación entre los valores observados y las salidas arrojadas por el modelo

S_O S_M : Desviaciones estándar de las variables entre los valores observados y las salidas arrojadas por el modelo.

Esta medida de bondad de ajuste se puede descomponer en tres términos que son:

- Diferencias entre la media del modelo y la de los datos. $(\bar{O}_i - \bar{M}_i)^2$
- Diferencias entre la varianza del modelo y la de los datos. $(S_O - S_M)^2$
- Componente aleatorio. $2 * (1 - r^2) S_O^2 S_M^2$

De manera que si se divide el MSEP entre estos tres componente entonces se podrá tener la proporción del error debido a cada uno, lo que nos puede suministrar información útil a la hora de discernir la fuente de los posibles errores en los modelos que se planteen.

Índice de Eficiencia del Modelo Nash and Sutcliffe

$$NS = 1 - \frac{\sum (O_i - M_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2}$$

Ec. 2. 5

Para tener un criterio de clasificación según este índice, la tabla 2.2 nos muestra los valores de referencia según Molnar (2011):

Tabla 2. 2. Valores Referenciales del Índice de Nash Stutcliffe	
Valor	Categoría
< 0,2	Insuficiente
0,2 - 0,4	Satisfactorio
0,4 - 0,6	Bueno
0,6 - 0,8	Muy Bueno
> 0,8	Excelente

Fuente: Molnar (2011).

Análisis Estadístico de Verosimilitud

Una función de verosimilitud es una función que busca la minimización del error. Desde el punto de vista de la simulación y construcción de modelos, una función de verosimilitud se encuentra estructurada por dos componentes, el primero de ellos es un conjunto de datos y el segundo de ellos es un conjunto de parámetros (θ). Dicha función se puede expresar de la siguiente manera:

$$E(\theta/x_i) = P(x_i/\theta) = p_i. \quad \text{Ec. 2. 6}$$

Donde:

$E(\theta/x)$: Función de verosimilitud.

p_i : es la probabilidad de seleccionar un punto en los valores de los datos, cuando se conoce el verdadero valor del parámetro (θ).

Para poder estimar la función de verosimilitud, se parte del hecho de que lo que se quiere es minimizar el error entre el valor observado y el valor simulado por el modelo. Ahora bien, si se quiere estimar un valor (y_i) cualquiera, esto se puede hacer mediante la siguiente expresión:

$$y_i = f(x_i; \theta_j) + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ec. 2. 7}$$

Donde

$f(x_i; \theta_j)$: Es el modelo que predice el valor de y_i , el cual depende de el valor de un dato, y del valor del parámetro del modelo.

ε_{ij} : Término de error.

El término de error es definido como la diferencia que existe entre un valor observado y un valor simulado. Para determinar una función de verosimilitud, se hace necesario partir de uno de los supuestos del análisis de regresión, el cual dice para un conjunto de datos cualesquiera (x_i, y_i), donde. x_i : son los valores observados, y y_i : son los valores simulados, la función de densidad de los errores, se debe comportar como una distribución Normal o Gaussiana, además, los errores tienen que ser independientes. Lo anterior se puede expresar de la siguiente manera:

$$\varepsilon_i \sim NID(\mu, \sigma^2) \quad \text{Ec. 2. 8}$$

Por otro lado, si una variable aleatoria x que sigue una distribución normal, su función de densidad se encuentra determinada por la siguiente expresión:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2} \quad \text{Ec. 2. 9}$$

En este caso:

μ : Media.

σ^2 : Varianza.

x : Datos o valore observado.

Por otro lado, si se quiere ajustar un dato cualquiera y_i , este valor se sustituye en lugar de x , en la expresión presentada anteriormente, y la media en ese caso será una función del modelo con sus respectivos parámetros, es decir $f(x_i; \theta_j)$, quedando de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(y_i - f(x_i, \theta_j))^2} \quad \text{Ec. 2. 10}$$

Ahora, la función de verosimilitud, de todos los datos y_i , asumiendo que los errores se distribuyen según una distribución normal, será la siguiente:

$$\begin{aligned} L[\theta\sigma^2 / y_i, f_j(x_i)] &= \prod \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(y_i - f(x_i, \theta_j))^2} \\ &= \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \right]^n e^{-\frac{\sum (y_i - f(x_i, \theta_j))^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \quad \text{Ec. 2. 11}$$

Esta ecuación tiene propiedades importantes:

- $\sum (y_i - f(x_i, \theta_j))^2 = RSS$ (Suma de Cuadrado de los Residuos). Es el menor error Cuadrático entre los valores observados y simulados.
- Para un conjunto determinado de modelos y parámetros, que tienen un error grande, implica que en la función de verosimilitud tienen un valor pequeño. Esto se debe a que el argumento de la función exponencial en (*) es negativo en consecuencia: $e^{-(\infty)} \rightarrow 0$. En otras palabras si la diferencia entre los valores observados y los simulados es grande, implica que existe una gran desajuste, entonces la función exponencial tiende a cero de manera conjunta con la función de verosimilitud, por lo que la idea es maximizar dicha función.
- Existe un máximo único, el máximo de verosimilitud el cual corresponde al mínimo de $\sum (y_i - f(x_i, \theta_j))^2$.

- Esta función de verosimilitud tiene dos parámetros a estimar que son θ y σ^2

Donde

θ : parámetros que acompañan la función que simula el sub proceso.

$$\sigma^2 = RSS / n = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \theta_j))^2}{n} \quad \text{Ec. 2. 12}$$

De manera que sustituyendo y manipulando algebraicamente en (*) se tiene que:

$$L[\theta\sigma^2 / y_i, f_j(\cdot) x_i] = \left[\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right]^{n/2} e^{\left(-\frac{n}{2} \right)} \quad \text{Ec. 2. 13}$$

Tomando logaritmos a ambos lados de la desigualdad se tiene que:

$$L[\theta\sigma^2 / y_i, f_j(\cdot) x_i] = -\left(\frac{n}{2} \right) L_n(\sigma^2) - \left(\frac{n}{2} \right) L_n(\pi) - \left(\frac{n}{2} \right) \quad \text{Ec. 2. 14}$$

Donde:

$$L[\theta\sigma^2 / y_i, f_j(\cdot) x_i]: \text{Función de verosimilitud. Ec. 2. 15}$$

Como se puede observar sólo el primer componente contiene el parámetro que maximiza la función de verosimilitud ya que los dos últimos términos son constantes en dicha función. De manera que si se quiere buscar el mejor modelo entre una serie de opciones, basta con buscar el máximo de la función de verosimilitud. En conclusión se puede afirmar que al maximizar la función de verosimilitud se está encontrando el conjunto de parámetros que mejor se ajusta entre los valores simulados y el conjunto de datos del cual se disponen. La aplicación de estos índices desarrollados nos dará indicios de las variables, procesos o compartimientos que tienen que ser mejor estudiados para así poder plantear modelos sucesivos.

Criterio de Información de Akaike (AIC)

El Criterio de Información de Akaike es una prueba estadística, la cual permite escoger entre la calidad del ajuste de varios modelos, en función a la complejidad de los mismos. Esta técnica se basa en el cálculo de la función de verosimilitud y en el número de parámetros de cada modelo. Esta prueba se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$AIC = -2L[\theta \sigma^2 / y_i, f_j(x_i)] + 2 * k \quad \text{Ec. 2. 16}$$

El primer factor que se encuentra después de la igualdad decrece en la medida que el número de parámetros se incrementa, mientras el segundo factor se incrementa. Esto hace que el mejor modelo según este criterio será aquel que presente el menor valor.

2.3.4. Análisis de Sensibilidad.

El análisis de sensibilidad consiste en un estudio sistemático de cómo afectan a las conclusiones de un modelo las posibles variaciones en los valores de los parámetros y en las relaciones funcionales que incluye. La forma más simple de realizar el análisis consiste en modificar los valores numéricos de cada uno de sus parámetros. Para ello se efectúan variaciones en el valor del parámetro cuya sensibilidad se quiere estudiar en un cierto porcentaje y se analiza en qué medida esta variación afecta a las conclusiones del modelo. Realizándolo de forma sistemática para todos los parámetros, con incrementos y decrementos previamente establecidos, se puede tener una evaluación de los efectos de esas modificaciones sobre las conclusiones del modelo. Diremos que el modelo es insensible a las variaciones de los parámetros, si variaciones razonables de ellos no afectan sensiblemente a las conclusiones que se extraen del mismo (Aracil, 1995).

Los métodos para la realización del análisis de sensibilidad son diversos, Hamby (1994) hace mención de algunos de ellos, entre los cuales se pueden

mencionar: análisis diferencial de sensibilidad, diseño de uno a la vez, diseño factorial, índice de sensibilidad entre otros. A continuación se dará una explicación en detalle de algunos de los métodos de análisis de sensibilidad.

Análisis de sensibilidad diferencial.

Esta técnica conocida también bajo el nombre de método directo, es considerada como la columna vertebral de las demás técnicas de análisis de sensibilidad. Consiste en definir un “Caso Base” basado en la colocación de todos los parámetros cerca de sus valores promedios, para luego ir variando un solo parámetro, manteniendo constante los demás. Luego, se estructuran técnicas diferenciales con las salidas del modelo, para que se pueda discernir sobre las condiciones óptimas deseables en el sistema evaluado. La magnitud de la sensibilidad se encuentra referida a la comparación de las salidas del modelo que son producto de las técnicas diferenciales, con la salida del modelo del Caso Base. (Hamby, 1994).

Este tipo de análisis de sensibilidad que se encuentra basado en la resolución de técnicas de diferenciación parcial son eficientes desde el punto de vista computacional, sin embargo la solución de este tipo de sistemas en muchos casos es una tarea ardua.

Análisis de sensibilidad de uno a la vez.

Este es uno de los métodos más prácticos de implementar. Consiste en realizar repetidas veces, la variación de un parámetro manteniendo los demás constantes. En tal sentido, el parámetro se varía en forma porcentual, manteniendo los demás constantes y luego se cuantifica el cambio porcentual en las salidas del modelo. El criterio para el rango de variación de los parámetros que intervienen en el análisis de sensibilidad puede ser el de un

factor que multiplica la desviación estándar, en consecuencia se puede variar el parámetro $\pm k$ desviaciones estándar. (Hamby, 1994)

Diseño Factorial.

El diseño factorial es útil cuando se quiere estudiar el efecto de una variable producido por dos o más factores, convirtiéndose en uno de los métodos más eficientes. En este diseño se tiene que implementar todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores, en cada ensayo del experimento. (Montgomery, 1999). Los resultados obtenidos de esta manera son utilizados para determinar la sensibilidad de los parámetros, a través de análisis estadísticos, que determinan si existen cambios estadísticamente significativos en la variable respuesta del modelo.

2.4. Descripción del Proceso del Balance Hídrico del ecosistema.

El concepto de balance hídrico se analiza a partir del concepto de balance en contabilidad, es decir, que es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo en un intervalo de tiempo determinado, así como la evaluación de los flujos internos dentro del ecosistema. Sintéticamente puede expresarse por la fórmula:

$$\text{Estado}_{t+1} = \text{Estado}_t + \sum_{i=1}^N \text{Entradas}_i - \sum_{j=1}^M \text{Salidas}_j$$

Ec. 2. 17 (Balance hídrico)

A continuación se dará una descripción detallada del proceso del balance hídrico en un agroecosistema. Aunque es de aclarar que no todos los procesos mencionados, serán modelados. En la Figura 2.6 se puede observar un esquema general del balance hídrico (Suelo-Planta-Atmósfera) en un ecosistema, aclarando que sólo aquellos procesos cuyas flechas se encuentran enmarcadas con un color, son los que se modelan en este trabajo. Se observa que el agua en el ecosistema puede entrar a través de la precipitación y/o el riego. Esta

entrada tiene dos formas de llegar al suelo: una es el agua que llega directamente al suelo en caída libre, y la otra es el agua que es retenida temporalmente en el dosel y luego gotea o se escurre. En este segundo caso existen a su vez tres acontecimientos. El primero de ellos se refiere al porcentaje de agua que retorna a la atmósfera a través del proceso de interceptación. Este porcentaje varía de acuerdo a la cobertura del suelo y al tipo de vegetación. Ataroff y Sánchez (2000) reporta para un cultivo de papa en los Andes venezolanos valores de porcentaje de agua interceptada del 27%, como promedio de un ciclo de cultivo.

El segundo acontecimiento que puede suceder respecto al agua que cae en el dosel, se encuentra referido al porcentaje que retorna a la atmósfera a través del proceso de evaporación (proceso conocido como interceptación). Es de notar que este porcentaje depende de diversos factores tales como el tipo de cultivo, etapa de desarrollo y la cobertura del mismo. Y el tercer acontecimiento se refiere al agua que llega al suelo bien sea a través del goteo o por el escurrimiento por el tallo del cultivo.

Una vez que el agua llega al suelo el agua puede ser distribuida de la siguiente manera: un porcentaje de ella es captada por la hojarasca y esta se evapora bien sea directamente de la hojarasca o cuando se queda empozada dentro de la misma, otra se escurre por la superficie a través del proceso de escorrentía superficial, y por último la otra parte del agua que no es captada por la hojarasca, penetra a capas posteriores del suelo a través del sub proceso de infiltración. Luego, el agua comienza a llenar todos los espacios posibles tanto en los macroporos como microporos, para que una vez que estos se encuentren llenos, ocurre el desplazamiento del agua. Dependiendo de las condiciones topográficas y del suelo, esta agua puede moverse a ecosistemas adyacentes a través del drenaje horizontal o escorrentía sub superficial. Además también puede ocurrir que el agua atraviese otras capas más profundas del suelo a través del proceso de percolación. Por último, cuando el

agua llega a la última capa del suelo puede ocurrir nuevamente el drenaje horizontal o puede llegar hasta el subsuelo a través de la percolación profunda.

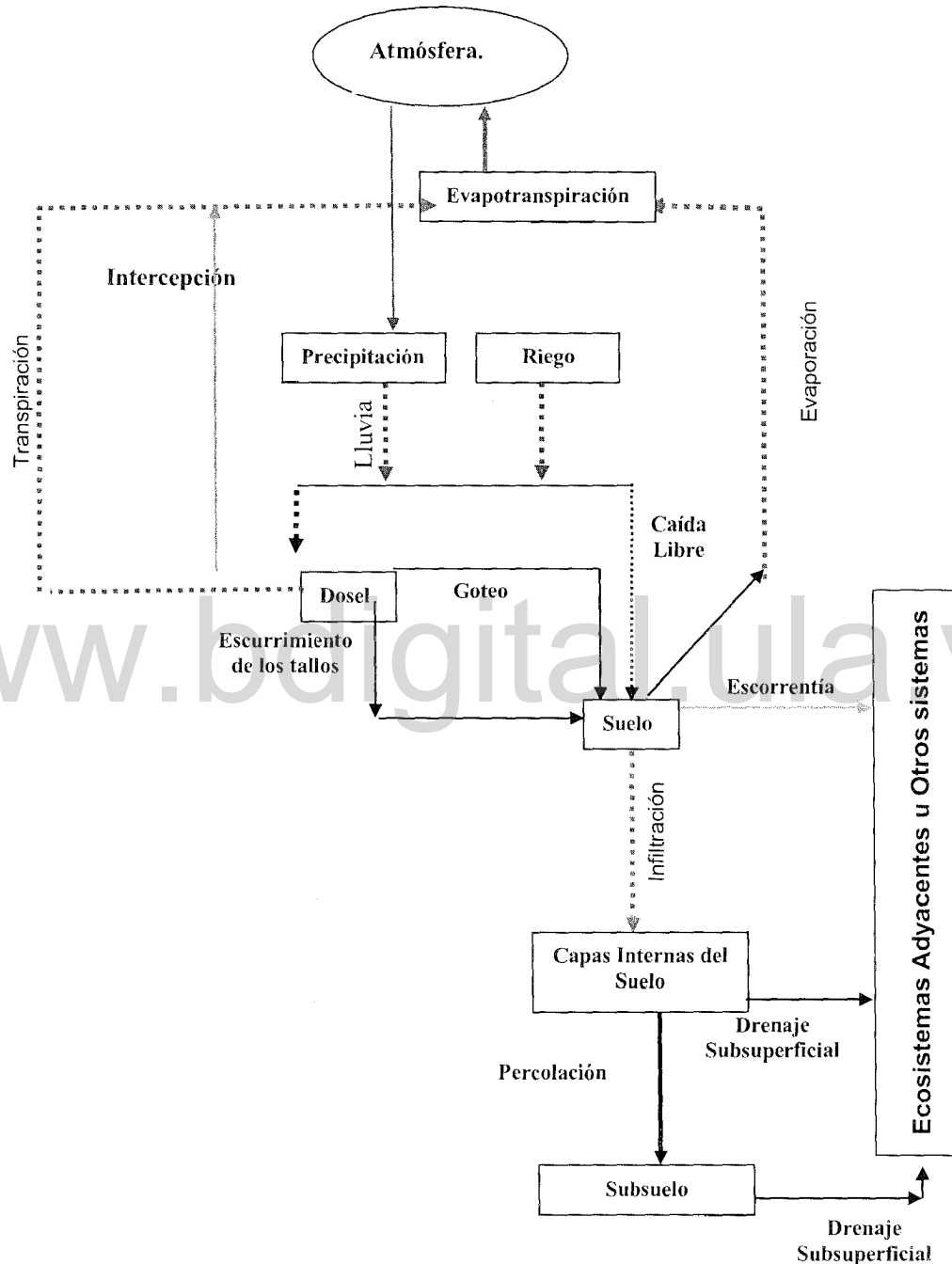


Figura 2. 6 Balance Hídrico en un ecosistema, suelo-planta- atmósfera.

Modificado de: Acevedo (1988)

En el balance hídrico de un ecosistema son muchos los sub procesos que intervienen, sin embargo, se hará mención de aquellos que formarán parte fundamental y significativa en los modelos que se desarrollan en este trabajo, o aquellos que intervengan como parámetros de entrada. Es de destacar que la omisión de otros procesos que son de menor relevancia en un balance hídrico no afectarán de forma significativa la cuantificación de los procesos relevantes que si son de interés en este estudio.

2.4.1. Precipitación

Se define precipitación a toda forma de agua que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. De acuerdo a esta definición, las lluvias, las granizadas, las lloviznas y las nevadas son formas distintas del mismo fenómeno de la precipitación (Chereque, 2011). Otros flujos que forman parte de la precipitación son: La precipitación horizontal o intercepción de neblina, que por lo general estos tipos de flujos son ignorados.

En los Modelos de Balance Hídrico la precipitación es considerada como una entrada de agua en el sistema. Por otro lado, cuando el balance hídrico se encuentra enmarcado en un agroecosistema, el riego que se aplica a un cultivo de manera conjunta con la precipitación, son considerados también como una entrada al sistema. A pesar de que existen diversas características que son propias de los eventos de lluvia como lo son: la cantidad, duración, intensidad y frecuencia, para los fines de este trabajo el proceso de precipitación será considerado a nivel diario tomando en cuenta la cantidad total diaria expresada en milímetros, que será usado como una variable exógena en el modelo de balance hídrico.

2.4.2. Intercepción

La intercepción es el proceso que ocurre cuando una fracción de la precipitación queda en las hojas de las plantas, que luego es evaporada. Como

este proceso es proporcional a la cobertura vegetal se espera entonces que a mayor cobertura vegetal mayor sea la cantidad de precipitación interceptada y a menor cobertura vegetal, menor será la cantidad de precipitación interceptada, aunque también intervienen otras características del dosel como su arquitectura y propiedades de las superficies de las hojas.

2.4.3. Infiltración de Agua en el Suelo

La infiltración se define como el proceso por el cual el agua penetra por la superficie del suelo y llega hasta sus capas inferiores. Muchos factores del suelo afectan el control de la infiltración, así como también gobiernan el movimiento del agua dentro del mismo y su distribución durante y después de la infiltración Vélez y Vélez (2002).

El proceso de infiltración no deja de ser complejo a la hora de su cálculo, debido a los factores que intervienen en él, dentro de los cuales se pueden mencionar algunos: permeabilidad y humedad del suelo, así como la característica de la cubierta vegetal, incluso la intensidad y la duración de la precipitación.

2.4.4. Escorrentía Superficial

Es el flujo superficial que se produce cuando la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración. Los factores que afectan el proceso de escorrentía superficial en los agroecosistemas están relacionados con la precipitación (intensidad, frecuencia, duración, y cantidad), cobertura vegetal (formas de vida, arquitectura, estructura, y densidad), textura y estructura del suelo, pendiente de terreno (forma y grado y longitud) y de los efectos que en los factores antes mencionados tienen las prácticas de manejo agropecuario empleadas (Spedding, 1979; Coleman y Hendrix, 1988, citado por Díaz, 2007).

A medida que aumenta la pendiente del terreno, el agua que se encuentra sobre la superficie tiene mayor energía potencial y disminuye la altura de la película de agua necesaria para comenzar su descenso, favoreciendo la dinámica del proceso de escorrentía superficial, aumentando su poder de arrastre y su salida del agroecosistema (Gavande, 1991, citado por Díaz, 2007).

2.4.5. Drenaje.

Se define como la salida del exceso de agua gravimétrica, hacia la napa freática o hacia un sistema de drenaje lateral, cuando el suelo se encuentra saturado. En el momento en que la humedad del suelo supera el límite de capacidad de campo se producen pérdidas de agua por drenaje, ello se debe al aumento del volumen de agua en el suelo, ya sea por infiltración, flujo lateral o almacenamiento interno (Díaz, 2007).

2.4.6. Evapotranspiración

El proceso de evapotranspiración en este estudio es, si se quiere, el más complejo. Es a su vez el producto de tres subprocesos que ocurren de manera simultánea:

- La Evaporación del suelo
- Transpiración de las Plantas.
- Intercepción del agua por parte del dosel.

La **Evaporación del suelo** es el proceso en la cual agua líquida es convertida a vapor de agua (vaporización) y removida de la superficie evaporativa (remoción de vapor). El agua se puede evaporar de una variedad de superficies tales como: lagos, ríos, pavimentos, suelos, y vegetación húmeda. El proceso en el cual las moléculas de agua de líquido pasan a vapor directo, se lleva a cabo a través de la energía que es proporcionada por la temperatura del ambiente del

aire y una vez que se transforma en vapor de agua ésta es removida de la superficie (superficie evaporativa) por la diferencia entre la presión del agua en la superficie evaporativa y la presión que se encuentra en la atmósfera (Allen et al 1998., p.1).

Los factores que intervienen en el proceso de evaporación son diversos dependiendo del tipo de suelo. Por ejemplo, cuando la evaporación ocurre desde la superficie de un suelo cultivado, factores como: la cobertura del cultivo y la cantidad de agua disponible en la superficie evaporativa tienen que ser tomados en cuenta a la hora de calcular éste subproceso.

Por otro lado la **Transpiración de las Plantas** consiste en la vaporización de agua líquida contenida en los tejidos de las plantas a la atmósfera. Los cultivos primordialmente pierden su agua a través de los estomas. Similar al proceso de evaporación, en la transpiración son diversos los factores que intervienen desde factores ambientales tales como: presión de vapor, radiación, temperatura del aire, humedad del aire, y velocidad del viento, así como: el contenido de agua en el suelo, y la capacidad del suelo para conducir el agua a las raíces del cultivo, además de las características del cultivo. Todos ellos ejercen influencia en la estimación de las tasas de transpiración (Allen et al. 1998, p. 3).

En el campo agrícola, cuando el cultivo es pequeño, predomina la pérdida de agua por el proceso de evaporación del suelo, pero una vez que el cultivo se encuentra bien desarrollado, la transpiración viene siendo el factor predominante de pérdida de agua (Sentelhas et al. 2010).

El concepto de evapotranspiración surge de la dificultad de realizar la desagregación entre evaporación y transpiración. Por tanto la evapotranspiración constituye la transferencia total de agua desde un suelo con cobertura vegetal a la atmósfera (Domingo et al. 2011).

Para el cálculo de la evapotranspiración suelen utilizarse dos conceptos:

Evapotranspiración Potencial (ETP)

Es la máxima evapotranspiración posible bajo las condiciones ambientales existentes, cuando el suelo está abundantemente provisto de agua (ha alcanzado su capacidad de campo), y cubierto con una cobertura vegetal completa.

Evapotranspiración Real (ETR)

Es la evapotranspiración que ocurre en condiciones reales, teniendo en cuenta que no siempre la cobertura vegetal es completa ni el suelo se encuentra en estado de saturación. En consecuencia, la evapotranspiración real suele ser menor que la evapotranspiración potencial.

Han sido numerosos los científicos y especialistas que se han dado a la tarea de desarrollar una gran variedad de métodos empíricos, en un esfuerzo para estimar la evapotranspiración potencial. En este trabajo se implementan tres métodos o formas particulares de cálculo de la evapotranspiración, en los cuales el punto de referencia será el método para el cálculo de la evapotranspiración de Penman Monteith. Antes de entrar en detalle con el desarrollo de los métodos para el cálculo de la evapotranspiración presentados en Allen, et al. (1998), se hace pertinente explicar con detalle, el método de Penman Monteith, ya que este método servirá como punto de referencia, para explicaciones posteriores.

El método de Penman Monteith es uno de los más utilizados para estimar la ETP, el cual requiere de datos de entrada tales como: radiación solar, velocidad del viento, y humedad relativa. En este caso se asume que la evaporación total es debida a dos términos: un término de energía (dominado por la radiación solar neta), y un término aerodinámico (llevado por la velocidad del viento y la humedad relativa); la temperatura de la atmósfera para el cálculo de la evapotranspiración, afecta ambos términos.

La ecuación de Penman Monteith está dada por:

$$\lambda ETP = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad \text{Ec. 2. 18}$$

Donde:

λ : Calor latente de vaporización. $MjKg^{-1}$

R_n : Radiación solar neta. $Mjm^{-2}dia^{-1}$

G : Flujo de calor del suelo. $Mjm^{-2}dia^{-1}$

$(e_s - e_a)$: Déficit de presión de vapor del aire. kPa

ρ_a : Densidad media del aire a presión constante. Kgm^{-3}

C_p : Calor específico del aire $\approx 1.013 \times 10^{-3}$. $MjKg^{-1}^{\circ}C^{-1}$

Δ : Pendiente de la relación entre presión de vapor y temperatura (Vapor de

Saturación) $\Delta = \frac{\partial e^0}{\partial T}$. $kPa^{\circ}C^{-1}$

e^0 : Presión de Vapor Saturado. kPa

T : Temperatura $^{\circ}C$

γ : Constante psicrométrica. $\gamma \approx 0.066$. $kPa^{\circ}C^{-1}$

r_a : Resistencia aerodinámica. sm^{-1}

r_s : Resistencia de la superficie. sm^{-1}

Calor latente de vaporización λ .

Expresa la energía requerida para cambiar unidades de masa de agua líquida a vapor de agua en una presión constante, normalmente se asume que $\lambda \sim 2.45$ $MjKg^{-1}$.

Radiación Solar.

En el proceso de la evapotranspiración interviene como la fuente más grande de energía capaz de cambiar grandes cantidades de agua líquida a vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede alcanzar la superficie evaporativa depende de la latitud y el día del año. La radiación solar cambia a lo largo del año para diferentes latitudes.

Radiación Solar Neta.

La Radiación Solar Neta R_n que es la que se necesita para el cálculo de la evapotranspiración es calculada como la diferencia entre la Radiación Neta de onda corta entrante R_{ns} y la Radiación Neta de onda larga de salida R_{nl} , quedando de la siguiente manera:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{Ec. 2. 19}$$

donde:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad \text{Ec. 2. 20}$$

R_{ns} : Radiación solar neta o radiación de onda corta $MJm^{-2}dia^{-1}$

α : Coeficiente de albedo, la cual es de 0.23 para el cultivo de referencia (*adimensional*).

R_s : Radiación solar entrante $MJm^{-2}dia^{-1}$.

Por otro lado la Radiación emitida de onda larga se calcula de la siguiente manera:

$$R_{nl} : 4.903e-009 * (((T_{Max} + 273.16)^4) + (\frac{(T_{Min} + 273.16)^4}{2})) * (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) * (1.35 * (R_{ad}/R_{so}) - 0.35)$$

Ec. 2. 21

Donde:

4.903e-009: Constante de Stefan Boltzmann $MJm^{-2}dia^{-1}$.

T_{Max} Temperatura máxima absoluta durante un período de 24 horas. (K)

T_{Min} : Temperatura mínima absoluta durante un período de 24 horas. (K).

e_a : Presión de vapor actual kPa

R_{ad} : Radiación Solar entrante $MJm^{-2}dia^{-1}$

R_{so} : Radiación Solar de cielo despejado $MJm^{-2}dia^{-1}$.

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad \text{Ec. 2. 22}$$

Donde:

z : Elevación sobre el nivel del mar m

R_a : Radiación Extraterrestre $MJm^{-2}dia^{-1}$

Radiación extraterrestre (R_a)

Esta radiación es la que se recibe diariamente en la superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera. Para su cálculo de forma diaria se generalizará tomando en cuenta la latitud, la declinación solar y el tiempo del año, estimándose de la siguiente manera

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad \text{Ec. 2. 23}$$

Donde:

R_a :Radiación extraterrestre $MJm^{-2}dia^{-1}$.

G_{sc} :Constante solar = $0.0820 MJm^{-2} min^{-1}$.

d_r :Distancia relativa inversa Tierra-Sol.

ω_s : Ángulo de radiación de la puesta del sol (Radianes).

φ : Latitud (Radianes).

δ : Declinación solar (*Radianes*).

La distancia relativa inversa Tierra-Sol d_r y la declinación solar δ están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$d_r = 1 + 0.33 \cos \left[\frac{2\pi}{365} j \right] \quad \text{Ec. 2. 24}$$

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} j - 1.39 \right) \quad \text{Ec. 2. 25}$$

Donde (j) es el número del día del año entre 1 y 365 o 366 según el año.

El ángulo de la hora de la puesta del sol ω_s esta dado por:

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi)\tan(\delta)) \quad \text{Ec. 2. 26}$$

Densidad del flujo de calor del suelo (G):

La densidad del flujo térmico del suelo es la energía utilizada en el calentamiento del suelo, siendo positiva cuando el suelo se calienta (absorbe energía) y negativa cuando el suelo se enfría (emite energía). Como los flujos térmicos del calor del suelo son pequeños comparados con R_n , pueden ser ignorados, sobre todo al considerar un paso de tiempo diario, en el que habria un equilibrio entre los flujos negativos y positivos y una relativa constancia en la temperatura media diaria del suelo. En consecuencia, en este proyecto, este término será ignorado para el cálculo de la evapotranspiración.

Presión real de vapor (e_a)

Cuando un volumen de aire se encuentra retenido sobre una superficie evaporante de agua, se alcanza un equilibrio entre las moléculas de agua que se incorporan al aire y las que vuelven a la fuente de agua. En ese momento, se considera que el aire está saturado puesto que no puede almacenar ninguna

molécula de agua adicional. La presión correspondiente se llama presión real de vapor.

Presión de vapor de saturación (e_s)

Se calcula como el promedio de las presiones de vapor de saturación en su temperatura máxima y mínima respectivamente, su unidad de medida es kilopascal: KPa . La expresión para su cálculo se presentará más adelante.

Densidad del aire media en presión constante.

Expresa la relación masa por volumen de la atmósfera, en función de la presión del aire y la temperatura. La cual se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\rho_a = \frac{P}{R * T} \left(Kg / m^3 \right) \quad \text{Ec. 2. 27}$$

Donde:

P : Presión del aire. (KPa).

R : Constante específica de gas para el aire $287.05 J / Kg^{\circ} K$

T : Temperatura $^{\circ} K$.

Resistencia aerodinámica. (r_a):

Describe la resistencia de la vegetación en su parte superior, tomando en cuenta la fricción de los flujos del aire a través de la cubierta vegetal. Dicha resistencia se puede determinar por la siguiente expresión:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad \text{Ec. 2. 28}$$

Donde:

r_a : Resistencia Aerodinámica. (seg / m).

z_m : Altura a la cual es medida la velocidad del viento. (m).

z_h : Altura a la cual es medida la humedad. (m).

d : Zona de cero desplazamiento de altura. (m).

z_{om} : Longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia del momento. (m).

z_{oh} : Longitud de la robustez que gobierna la transferencia de calor y vapor. (m).

k : Constante de Von Karman. $k \approx 0.41$.

u_z : Velocidad del viento en la altura z [m/seg].

Resistencia Superficial (r_s)

Describe la resistencia del flujo de vapor a través de los estomas abiertos, área total de la hoja y la superficie del suelo. Y se calcula mediante la siguiente expresión.

$$r_s = \frac{100}{0.5 * LAI} \quad \text{Ec. 2. 29}$$

Donde:

LAI: Índice de Área Foliar. (adimensional)

(Allen, et al. 1998,p.21).

Una vez explicado el método de Penman Monteith, ahora se presenta los métodos desarrollados en Allen et al. (1998) para el cálculo de la evapotranspiración. Es de hacer notar que la razón por la cual en este estudio se adopta estas técnicas que se presentarán a continuación, es porque dentro de la gran variedad de métodos que existen para calcular este subproceso, los métodos presentados en Allen et al. (1998), han sido catalogados como los que mejor estiman la evapotranspiración para una amplia gama de localidades, ya que se calcula bajo una serie de supuestos que toman en cuenta las características del cultivo.

Los métodos que se presentan para el cálculo de la evapotranspiración potencial en Allen et al. (1998), son los siguientes:

- Evapotranspiración bajo cultivo de referencia ET_o .
- Evapotranspiración bajo condiciones estándar ET_c .
- Evapotranspiración de cultivos bajo condiciones no estándar ET_{adj} .

En la Figura 2.7 se observa la relación existente entre los tres métodos de estimación de la evapotranspiración descritos anteriormente. Se puede observar que en la primera fila de esta Figura que para el primer cálculo de la evapotranspiración de cultivos de referencia ET_o se requieren datos climáticos como radiación temperatura velocidad del viento y humedad, trabajando bajo los supuestos que son cultivos de referencia y que es un suelo sin limitaciones de agua. Por otro lado, la evapotranspiración bajo condiciones estándar ET_c es la evapotranspiración para cualquier cultivo que se calcula multiplicando la del cultivo de referencia por el factor propio de cada cultivo denominado coeficiente de cultivo y se trabaja con los supuestos de suelos sin limitaciones de agua y óptimas condiciones agronómicas, y por último, la evapotranspiración bajo condiciones no estándar ET_{adj} se basa en la ET_c pero se le agrega el coeficiente de cultivo y un coeficiente de stress de agua y de condiciones ambientales.

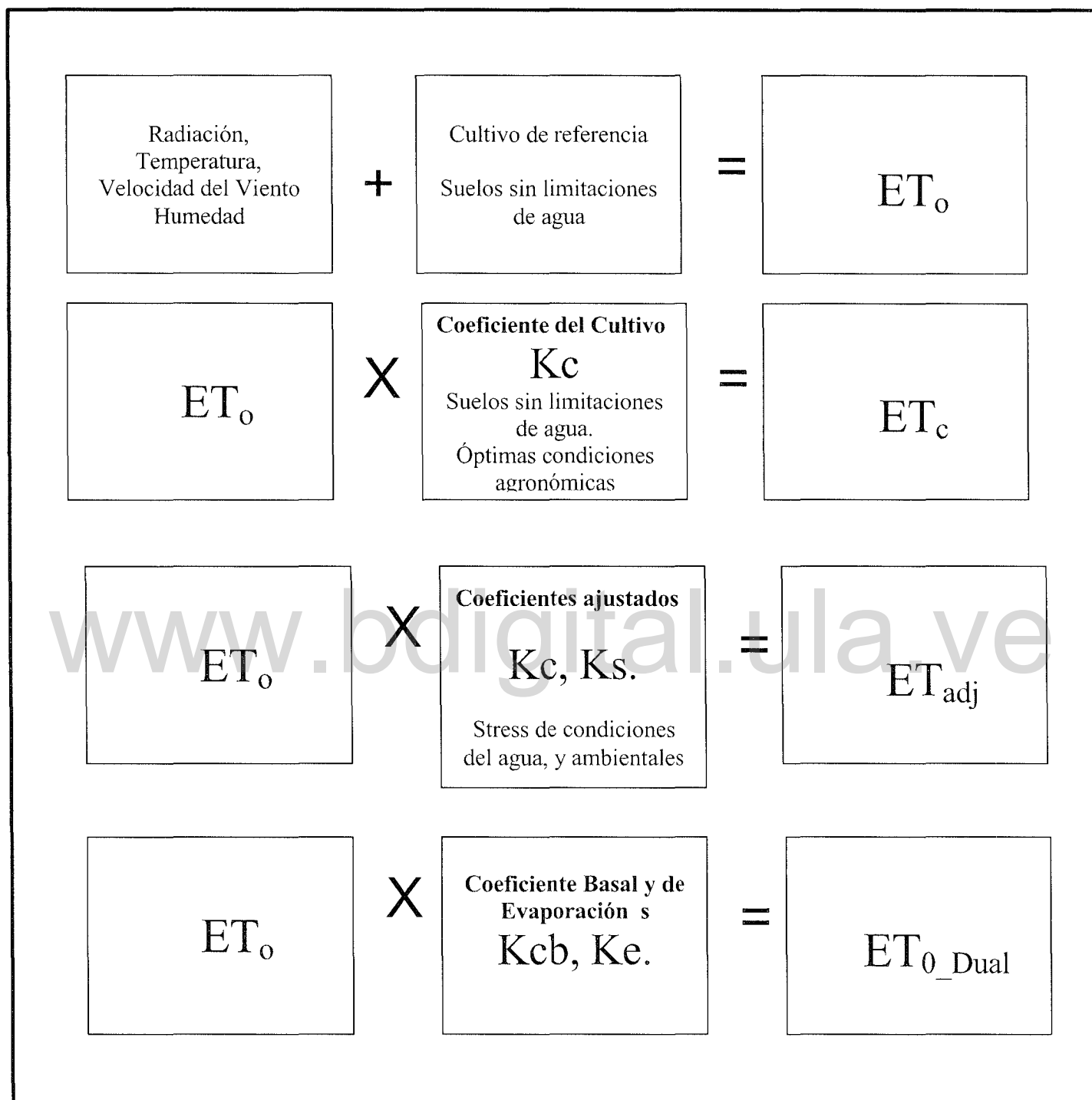


Figura 2. 7 Relación entre los Métodos de Evapotranspiración.

Fuente: Allen et al. (1998, p.6).

Evapotranspiración bajo cultivos de referencia ET_o .

La tasa de evapotranspiración en este caso es calculada sobre los siguientes supuestos:

- Se calcula para un cultivo de referencia el cual La Evapotranspiración es calculada bajo una superficie de referencia, la cual es un pasto hipotético con una altura de 0.12 m, una resistencia a la superficie aerodinámica fija de 70 sm^{-1} y un albedo de 0.23.
- Se calcula para condiciones donde no existen limitaciones de agua y los factores del suelo no afectan el cálculo de la evapotranspiración, es decir los factores del suelo no son tomados en cuenta para el cálculo de la evapotranspiración potencial.

Los insumos que se necesitan para su cálculo son datos climáticos tales como: radiación solar, humedad del aire, velocidad del viento, y temperatura atmosférica.

El cálculo de la evapotranspiración se encuentra basado en el método de Penman Monteith, pero incluye unas modificaciones hechas por el grupo de expertos de la FAO y para su determinación se utiliza la siguiente expresión:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ec. 2. 30}$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de cultivo de referencia (mm/dia)

R_n : Radiación Solar Neta en la superficie de referencia ($MJm^{-2}dia^{-1}$).

G : Densidad del flujo de calor del suelo $MJm^{-2}dia^{-1}$. $G \approx 0$

T : Temperatura media del aire diaria a una altura de 2 m ($^{\circ}C$).

u_2 : Velocidad del viento a una altura de 2 m (ms^{-1}).

(e_s) : Presión de vapor de saturación (KPa).

(e_a) : Presión de vapor actual (KPa).

$(e_s - e_a)$: Déficit de presión de vapor a saturación (KPa).

Δ : Pendiente de la curva de presión de la temperatura ($KPa^{\circ}C^{-1}$).

γ : Constante psicrométrica ($KPa^{\circ}C^{-1}$).

Se puede observar que algunos elementos que se presentan en esta metodología son los mismos que se describieron en la ecuación de Penman Moonteith, por lo que se procederá a describir aquellos que son novedosos en esta última ecuación presentada.

Temperatura del aire (T).

Se encuentra referida a la temperatura diaria del aire, tomada como la temperatura promedio registrada durante un período de 24 horas medida en grado centígrados, en este modelo es considerado como un parámetro de entrada. Su cálculo se resume promediando las temperaturas máximas y mínimas diarias, tal y como se muestra a continuación:

$$T: \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad \text{Ec. 2. 31}$$

Donde:

$T_{\max}$: Temperatura del aire máxima registrada durante un período de 24 horas. ($^{\circ}C$).

$T_{\min}$: Temperatura del aire mínima a registrada durante un período de 24 horas. ($^{\circ}C$).

Velocidad del viento (u_2).

Se refiere a la velocidad del viento medida a una altura de 2 m, que describe el desplazamiento del viento en $\frac{m}{seg}$, esta variable es considerada en el modelo como una variable exógena.

Presión de vapor actual (e_a).

Aunque existen diversas formas de calcularla según las variables que se utilicen, en este trabajo se calculara en función de la temperaturas máximas y mínimas y también en función de la humedad relativa tal y como se muestra a continuación.

$$e_a = \frac{e^0(T_{Min})^{\frac{RH_{Max}}{100}} e^0(T_{max})^{\frac{RH_{Min}}{100}}}{2}$$

Ec. 2. 32

Donde:

e_a : Presión de vapor actual (KPa).

$e^0(T_{Min})$: Presión de vapor de saturación diaria en la temperatura mínima (KPa).

$e^0(T_{Max})$: Presión de vapor de saturación diaria en la temperatura máxima (KPa).

RH_{Max} : Máxima Humedad Relativa diaria (%).

RH_{Min} : Mínima Humedad Relativa diaria (%).

La presión de vapor de saturación diaria se puede calcular en función de la temperatura del aire de la siguiente manera:

$$e^0(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right]$$

Ec. 2. 33

Donde el valor de la temperatura (T) se encuentra referido a los valores promedios diarios de temperatura.

Presión de vapor de saturación media (e_s)

Para el cálculo de la Presión de Vapor de Saturación media también existen diversas formas para su cálculo, dependiendo de la disponibilidad de los datos, para este estudio se calcula en función de las presiones de vapor calculadas en base a la temperatura del aire.

$$e_s : \frac{e^0(T_{Max}) + e^0(T_{Min})}{2} \quad \text{Ec. 2. 34}$$

Pendiente de la curva de presión de vapor Δ .

Representa la pendiente de la relación entre la presión de vapor de saturación y la temperatura, se encuentra expresado en kilopascal por °C ($KPa^\circ C^{-1}$), y se encuentra dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad \text{Ec. 2. 35}$$

Su cálculo puede ser simplificado en función de la presión de vapor de saturación quedando de la siguiente manera:

$$\Delta = 4098 * e^0(T) \quad \text{Ec. 2. 36}$$

Constante Psicrométrica (γ):

La constante psicrométrica está dada por la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \quad \text{Ec. 2. 37}$$

Donde:

γ : Constante psicrométrica. $kPa^\circ C^{-1}$

P : Presión atmosférica. kPa

λ : Calor latente de vaporización $2.45[MJ Kg^{-1}]$

c_p : Calor específico en presión constante $1.03 \cdot 10^{-3}[MJ Kg^{-1} ^\circ C^{-1}]$

ε : Cociente del peso molecular del vapor agua/aire seco
 $= 0,622$ (*adimensional*)

La presión atmosférica se puede calcular de la siguiente manera:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad \text{Ec. 2. 38}$$

P : Presión atmosférica KPa .

z : Elevación sobre el nivel del mar m

Este método es de vital importancia en la elaboración y modelización del subproceso de evapotranspiración, ya que los métodos posteriores se encuentran basados bajo esta ecuación.

Evapotranspiración bajo condiciones estándar ET_c .

Es el cálculo de la evapotranspiración bajo los siguientes supuestos:

- Los cultivos se encuentran libre de enfermedades, y bien fertilizados.
- El crecimiento de los cultivos se da en grandes parcelas o áreas bajo condiciones óptimas de agua en el suelo.
- El cultivo logra una producción cercana a su potencial bajo las condiciones climáticas dadas.

Para el cálculo de la ET_c , se necesita estimar el coeficiente del cultivo k_c . Este coeficiente trata de recoger los efectos de las características que distinguen al cultivo del pasto. El valor de este coeficiente varía según el tipo de cultivo y la

etapa de desarrollo en la cual se encuentre el mismo. En consecuencia, el cálculo de la ET_c queda determinado por la siguiente expresión:

$$k_c * ET_o.$$

Ec. 2. 39

Donde:

k_c : Coeficiente del cultivo.(*adimensional*)

ET_o : Evapotranspiración de cultivos de referencia.(*mm*)

El coeficiente de cultivo depende del tipo y de las características del mismo además de la etapa del crecimiento en la que se encuentre. La duración de estas etapas se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Inicial.
2. Desarrollo del cultivo.
3. Etapa media.
4. Etapa tardía.

Etapas Inicial.

Esta etapa comienza desde la fecha de la siembra hasta que se alcanza aproximadamente el 10% de la cobertura del suelo. La longitud de esta etapa depende enormemente del tipo y variedad del cultivo, fecha de siembra y del clima. Durante este período el área foliar es pequeña y la evapotranspiración predominante es en forma de evaporación desde el suelo. De ahí que el valor durante el período inicial sea grande cuando el suelo se encuentra húmedo, por riego o lluvia, y es bajo cuando la superficie del suelo se encuentra seca.

Etapas de desarrollo del cultivo.

Esta etapa comienza desde el 10% de cobertura del suelo hasta la cobertura efectiva completa o cuando el índice de área foliar sea mayor o igual a 3.

Debido a que en este estudio los cultivos de papa no alcanzan la cobertura efectiva completa, ni tampoco alcanzan un índice de área foliar de 3, la finalización de esta etapa queda determinada a que cuando el cultivo alcance una cobertura máxima dentro del ciclo crecimiento.

Etapas Media.

Esta etapa comienza desde la que la planta alcanza su valor máximo de índice de área_foliar hasta el comienzo de la maduración, que frecuentemente es marcado por el comienzo del envejecimiento marchitamiento o senescencia de las hojas al grado que la evapotranspiración es reducida de manera relativa a la evapotranspiración de referencia (ET_o).

Etapas Tardía.

Esta etapa comprende el período que abarca desde el día en que la planta alcanza su índice de área foliar máximo hasta la completa senescencia. O el día en la cual se cosecha. En consecuencia esta etapa finaliza cuando se recoge el cultivo.

El procedimiento de cálculo de la evapotranspiración de cultivos (ET_c) se puede resumir de la siguiente manera:

1. Identificar las etapas de crecimiento del cultivo, determinando así sus longitudes y seleccionando sus respectivos coeficientes (k_c).
2. Ajustar los coeficientes antes seleccionados de acuerdo a las frecuencias de riego o a las condiciones climáticas durante la respectiva etapa en el caso de que sea necesario.
3. Construir la curva del coeficiente del cultivo.
4. Calcular la ET_c . (Allen et al., 1998).

Evapotranspiración de cultivos bajo condiciones no estándar ET_{adj} .

En este caso se toma en cuenta factores que difieren de las condiciones estándar, entre otros: la presencia de plagas o enfermedades en los cultivos, salinidad y baja fertilidad del suelo, además de estrés hídrico. Es importante que estos factores sean tomados en cuenta ya que afectan el crecimiento y la densidad de las plantas y pueden reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de la ET_o .

La ET_{adj} es calculada al usar un coeficiente de estrés de agua (K_s) y/o por el ajuste de (K_c) para otros tipos de estrés y condiciones ambientales en la evapotranspiración de cultivos.

Evapotranspiración de cultivos con el coeficiente dual del cultivo (ET_{0_Dual}).

En este método el coeficiente del cultivo, es desplegado en dos coeficientes, uno para la transpiración del cultivo, es decir, el coeficiente basal (K_{cb}) y el otro para la evaporación del suelo (K_e). De forma que la expresión de la evapotranspiración de cultivos con el coeficiente dual es:

$$ET_{0_Dual} = (K_{cb} + K_e)ET_o \quad \text{Ec. 2. 40}$$

Donde:

(K_{cb}): Coeficiente basal de transpiración del cultivo. (*adimensional*)

(K_e): Coeficiente de evaporación del suelo. (*adimensional*)

El procedimiento de cálculo para la (ET_{0_Dual}) consiste en:

- Identificar la longitud de las etapas del crecimiento del cultivo y seleccionar los correspondientes coeficientes basales (K_{cb}).

- Ajustar los valores seleccionados de (K_{cb}) para las condiciones climáticas durante la etapa.
- Construir la curva del coeficiente basal.
- Determinar los valores diarios del (K_e) para la superficie de evaporación.
- Calcular $ET_{0_Dual} = (K_{cb} + K_e)ET_o$. Allen et al. (1998, p.102).

En este capítulo se han presentado los aspectos técnicos y conceptuales que intervienen en el desarrollo de este trabajo de investigación, en particular, se han mostrado las formas en cómo se calcularán los subprocesos del balance hídrico y en particular se han mostrado también, las diversas técnicas para calcular el subproceso de evapotranspiración. Las cuáles serán implementadas en los modelos que se desarrollaron en dicho trabajo.

www.bdigital.ula.ve

3 Capítulo III: Marco Metodológico

A continuación se describirá con detalle en qué consisten los experimentos que sirven como insumo para este estudio, así como también se hará una descripción de los modelos que se implementaron en el mismo.

3.1. *Descripción de los Experimentos de Campo*

La información que se dispone proviene de dos experimentos con cultivos de papa realizado en los Andes venezolanos. En cada uno de ellos se dispone de una base de datos que contiene registros de datos climáticos, de características del suelo y mediciones referentes al desarrollo del cultivo y su dinámica hídrica, que son de utilidad para los objetivos que persigue este estudio. A continuación se presentará con detalle cada uno de los experimentos.

3.1.1 Experimento 1 : Balance hídrico en Mixteque

Este experimento, que será denominado de ahora en adelante “Mixteque”, corresponde a un estudio realizado en tres posiciones topográficas en la localidad de Mixteque por Díaz, (2008). Los registros van desde el 20/07/2001 hasta el 19/12/2001, correspondiendo a un ciclo completo de un cultivo de papa. Mixteque es una localidad que se encuentra en el Municipio Rangel del Estado Mérida, a 6 km al Noreste de Mucuchies, capital del Municipio a 8° 46' N y 70° 54'. El sitio donde se recolectaron los datos dentro de esta localidad, se encuentra en la vertiente izquierda del río Chama, en una ladera donde a su vez se localizaron tres posiciones topográficas que se distinguen por diferentes pendientes y elevaciones. En la Tabla 3.1 se muestra la clasificación de las laderas de acuerdo a su pendiente y altitud, se puede observar que mantienen una relación lineal entre la pendiente y la altura, es decir, que en la medida que la ladera se encuentra en una menor altura también la pendiente disminuirá, tiende a ser más baja. Sin embargo,

el factor predominante de variación es la pendiente, y por ende el tipo de suelo, ya que varía en un rango muy amplio (entre 20 y 65%) mientras que la diferencia de altitud es de apenas 135 m. Estos datos provienen del trabajo de Díaz, (2007).

Tabla 3. 1. Balance hídrico de Mixteque. Distribución de las Laderas Según Pendiente y Altitud		
Ladera	Pendiente (%)	Altitud (m)
Alta	65	3047
Media	40	2952
Baja	20	2912

Mixteque ocupa un cono de deyección en la parte alta del río Chama. Zona de rocas cristalinas, metamórficas, predominantemente gneis. Alteritas erosionadas desde el cuaternario. Son suelos de Inceptisoles hasta Molisoles, de texturas desde Franco arenosas hasta franco arcillosas, drenaje rápido, estructura granulas hasta 42 cm. del perfil y blocosa angular hasta 120 cm., pedregosos, pH desde ácido hasta neutro (4,0 – 7,2). La vegetación dominante es de páramo: *espeletia*, *polylepis*, *Alnus*; forestales exóticas: Eucaliptos, fresno, *Alnus*; Forrajes: trébol, cebada; cultivos: hortalizas, trigo, avena, papas, etc. Suelos superficiales muy ricos en Materia orgánica. Zona de fuertes heladas. El área es principalmente agrícola con cultivos intensivos, es decir, cultivos que por lo general hacen uso de elementos químicos para obtener una gran producción. En cada una de las laderas se instalaron tres parcelas de 61,13 m². Cada parcela se subdividió en áreas más pequeñas donde se colocaron los diferentes dispositivos de medición: lisímetros, dispositivo de captación de sedimento y escorrentía, área de medición con sensores de humedad y área de colocación de pluviómetros. La aplicación del fertilizante orgánico y mineral, además de abonos, fue realizado antes de la siembra. El manejo del cultivo que se realizó fue similar al utilizado por los agricultores de la zona. La preparación del terreno se realizó con yunta de bueyes, se aplicó el fertilizante una vez y antes del surcado. La variedad de papa utilizada

para la siembra fue *Solanum tuberosum* var. *Granola*, procedente de Alemania Díaz, (2007).

La Figura 3.1 muestra la ubicación de las tres Laderas donde se recolectaron los datos que para efectos del experimento serán considerados como tratamientos. En este caso los registros climáticos provienen de una estación meteorológica que se encuentra ubicada en la ladera baja, donde se recolecto información de radiación temperatura y precipitación, mientras que la velocidad del viento se obtuvo de la estación del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), que se encuentra muy cerca de donde se ubicó el ensayo de campo. En la tabla 3.2 se puede observar la estructura de la base de datos que conforma este experimento de Mixteque. Las variables que son clasificadas como generales son aquellas que no se encuentran discriminadas bajo tratamientos, es decir que son los mismos valores para las tres posiciones de ladera. Por otro lado la frecuencia de los registros varía para cada variable, de acuerdo al tipo de registro, por lo que en los datos meteorológicos se dispone de una frecuencia diaria, en los del cultivo la frecuencia es de cada nueve días, y en los registros de agua en el suelo la frecuencia diaria. Adicionalmente, en aquellas variables que se encuentran discriminadas por tratamiento y cuya frecuencia no es diaria, la cantidad de registros se determinó tomando el promedio de datos por laderas. Ya que en estos casos los valores del número de datos varían en un rango pequeño de acuerdo a las laderas.

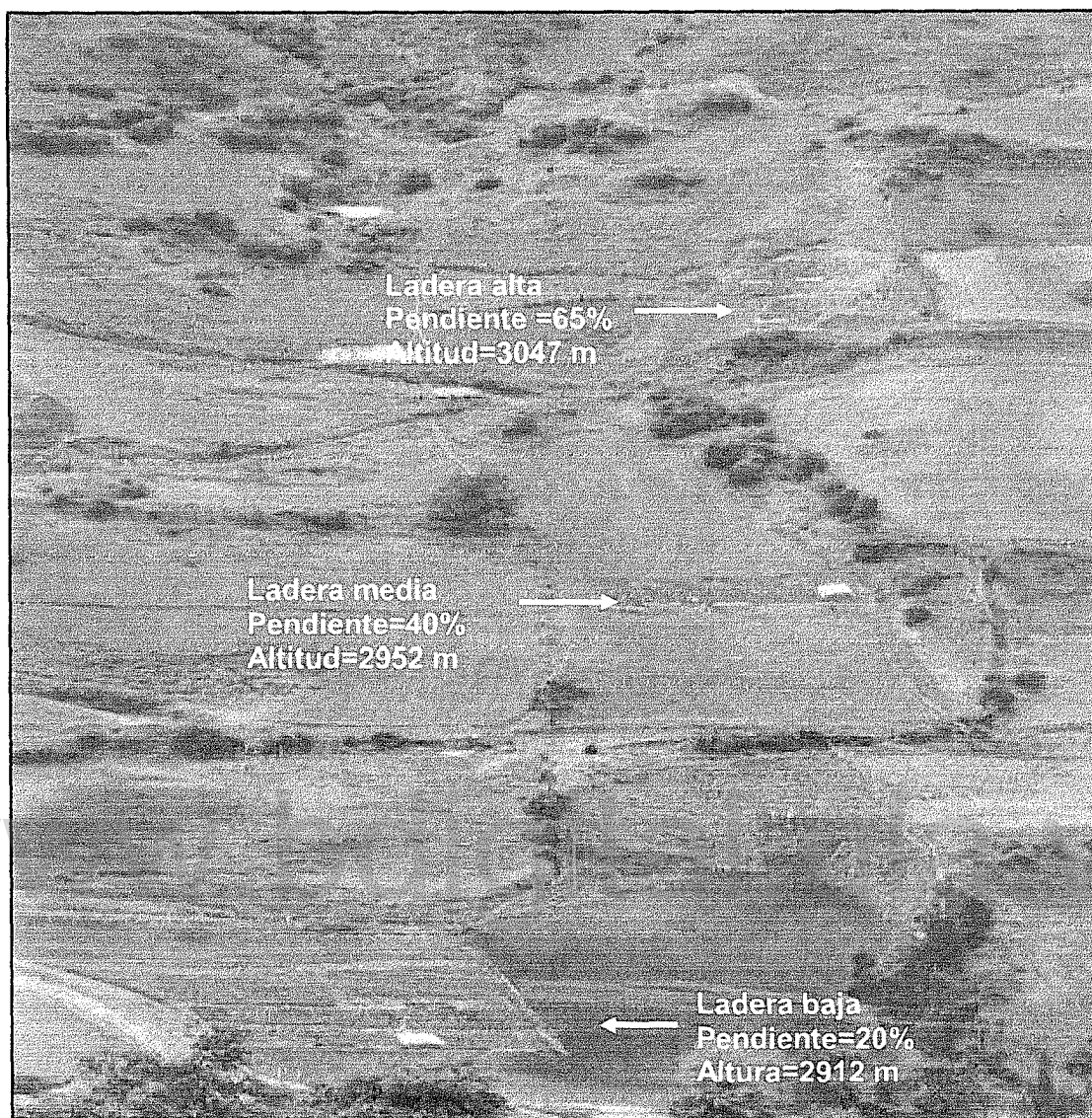


Figura 3. 1. Mixteque. Ubicación de las Laderas del experimento.

Fuente: Díaz, (2007)

En la tabla 3.2 se observa las variables que forman parte del experimento de Mixteque con sus principales características.

Tabla 3. 2. Balance hídrico de Mixteque. Lista de Variables Disponibles.

Descripción	Tipo de Registro	Generales	Tratamiento	Frecuencia Promedio de Registros Aproximada	Período	Cantidad de Registros
Cultivos en 3 laderas: Baja = 2900 m, Media = 2970 m, Alta = 3040 m, cada Ladera es considerada como un tratamiento	Meteorológicos	Velocidad del viento	Precipitación, Riego, Radiación, Temperatura Máxima Mínima y Promedio, Humedad Relativa Máxima Mínima y Promedio	Diario	29/06/2001 al 19/12/2001	140
	Cultivo		Índice de Área Foliar	9 días		16
	Suelo		Cantidad de Agua en el suelo en las capas 0-15, 15-30, Cantidad de Agua en el suelo promedio.	Diario		140
	Balance hídrico del agroecosistema		Drenaje Acumulado, Escorrentía Acumulada,	4 Días		16

Es necesario destacar en lo que se refiera a la variable Contenido de agua en el suelo, que a pesar de que existen registros en distintas capas, para efectos del experimento se promediarán éstas y ese será el valor con el cual se trabajará, ya que los modelos a emplear en este estudio se encuentran constituidos por una sola capa de 30 cm. Estos datos han sido recolectados en el trabajo presentado por Díaz (2007).

En la Figura 3.2, se resalta la ubicación geográfica de la localidad de Mixteque en el estado Mérida.

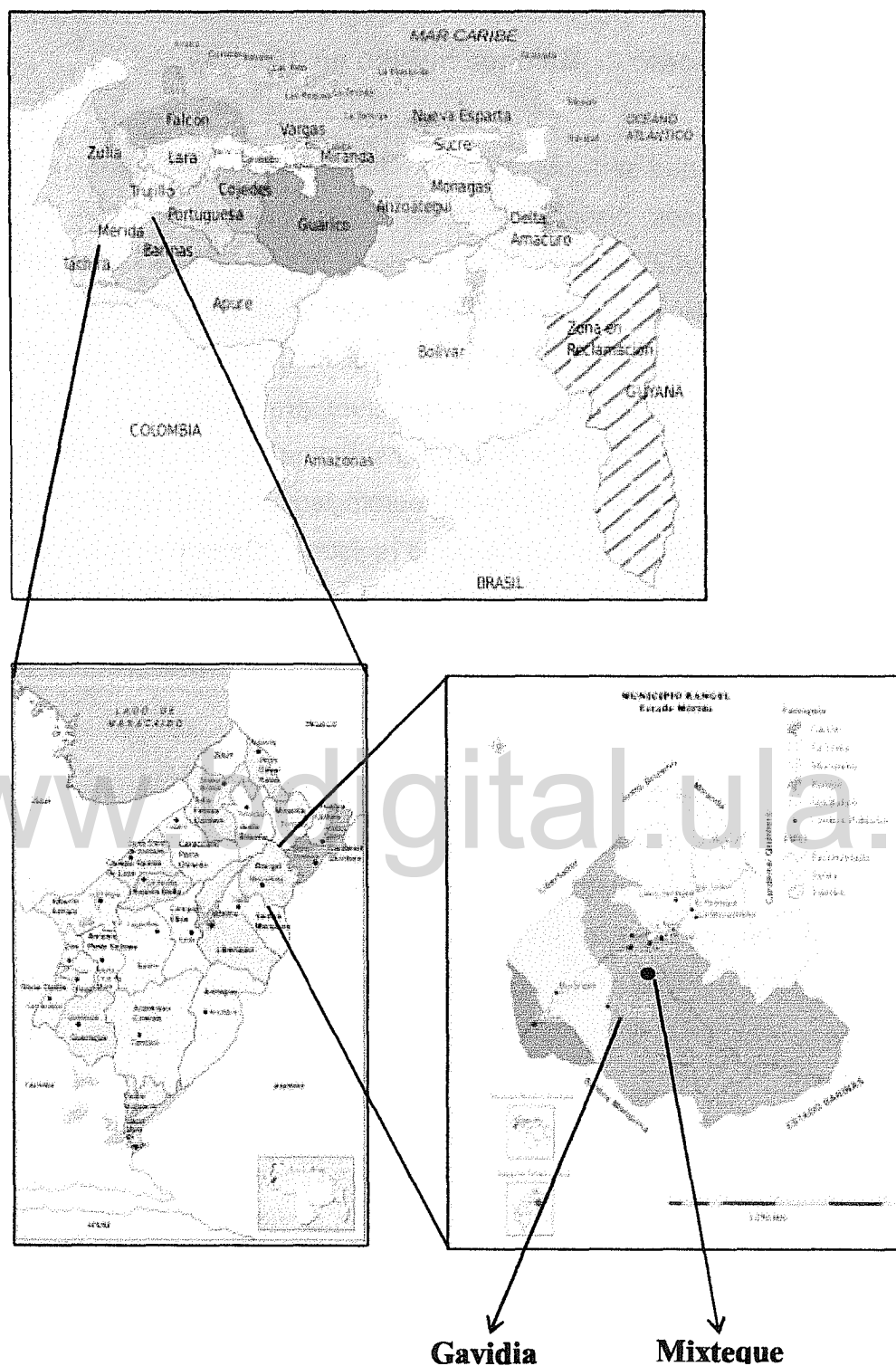


Figura 3. 2. Ubicación Geográfica de la Localidad de Mixteque y Gavidia- Mérida Venezuela.

Fuente: Corporación de los Andes.

3.1.2 Experimento 2. Balance hídrico en Gavidia.

En este experimento, que será denominado “Gavidia” se cultivó papa con varios tratamientos agronómicos, disponiéndose de registros diarios que van desde el 10/07/1992 hasta el 28/02/1993. El experimento se llevó a cabo en la localidad de Gavidia, que queda ubicada en el Municipio Rangel en el estado Mérida, a 8° 41' 23.11" N y 70° 55' 37.51" O a 3400 m de altitud, Posee una precipitación promedio anual de 1505 mm y una temperatura promedio anual de 8.9 °C. Análogamente, en la tabla 3.3 se presenta la estructura de datos del experimento de Gavidia destacando que en los datos meteorológicos son generales para todas las parcelas del experimento quedando como registros propios para cada parcela, los referidos al desarrollo del cultivo y mediciones de agua (contenido de agua en el suelo, escurrimiento, drenaje). Estos datos provienen de la tesis doctoral de Sarmiento (1995).

Para la realización de este experimento, se utilizaron dos campos en fases opuestas de ciclo agrícola, uno de ellos ha sido cultivado por tres años consecutivos y se encontraba en su primer año de descanso (Campo empobrecido), mientras que el otro se ha estado en reposo durante 15 años, (campo restaurado). Estos campos se encuentran ubicados de forma conjunta con una pendiente promedio del 22% los cuales tienen una pedregosidad y tipo de suelo similares.

El campo empobrecido tuvo una escasa cobertura de planta al principio del experimento con las hierbas *Rumex Acetosella* y *Lachemilla moritziana* como las especies dominantes. La Fisionomía del campo restaurado es similar a la que presenta el páramo, que se encuentra dominado por Rosetas *Espeletia schultzii* y arbustos que incluían *Baccharis prunifolia* y *Hypericum laricoides*. En cada campo se cultivó cultivadas 5 parcelas 10x10 m con papas, pertenecientes a la subespecie *Solanum tuberosum andigenum* conocida en la localidad como papa

negra arbolona, en este experimento se dejó un área de 500 m² sin cultivar Sarmiento (2000).

Las parcelas fueron diferenciadas por el tipo de fertilización aplicado, en ese sentido en cada terreno tres parcelas fueron fertilizadas con: 1 t/ ha/ y de NPK 16-16-08, quedando dos parcelas sin fertilización.

La medición de las variables se llevó a cabo de la siguiente manera: la precipitación fue medida a una altura de 1.50 m por encima del suelo usando seis pluviómetros en un diámetro de 15 cm. La escorrentía y pérdidas de agua fueron medidas en todas las parcelas, la entrada lateral del agua y sedimentos fueron evitadas por el cierre en la parte superior así como también de los bordes laterales en cada parcela. Un dispositivo de recolección de agua y sedimentos fue colocado en la parte superior de cada parcela el cual permitía obtener muestras de recolección de agua y sedimentos, en cada intervalo de medición. La humedad del suelo fue medida en la capa entre 0-20 cm en una muestra compuesta de agua en el suelo en cada parcela, obtenidas en una combinación de 10 muestras individuales. El punto de marchitez permanente y la capacidad de campo fueron estimados de una muestra compuesta del suelo en cada campo. El drenaje fue medido sólo en aquellas parcelas que fueron cultivadas, usando tres lisímetros monolíticos 1800 cm² en área, y 35 cm de profundidad en cada parcela. Un marcador fue colocado a 5 cm de espesor de la tierra en el fondo de cada lisímetro, se colocó una capa de 5 cm de arena gruesa se en la parte inferior de cada lisímetro, el cual se llena luego de tierra y piedras en la misma proporción que refleja las condiciones naturales, el borde superior de cada lisímetro fue enterrado varios centímetros por debajo de la superficie del suelo con el fin de no interferir con la escorrentía por último una planta de papa se sembró en cada lisímetro. El Índice de área foliar del cultivo fue determinado periódicamente durante los dos ciclos de cultivo utilizando el método del punto cuadrante (Greig Smith (1982), citado por Sarmiento (2000)), con este método se hizo la estimación

no destructiva de la biomasa (BIO) y el índice de área foliar se determinó mediante la ecuación $LAI = 1.041 * BIO$ Sarmiento, (1995).

En este experimento, la frecuencia de recolección de los datos varía de acuerdo al tipo de variable y al tipo de registro, en consecuencia en los datos de tipo meteorológico la frecuencia es diaria, y en los datos que se refieren al cultivo y al suelo, la frecuencia se determinó calculando el valor promedio entre todas las parcelas, ya que estas frecuencias varían en un rango pequeño entre dichas parcelas.

Tabla 3.3. Gavidia. Lista de Variables Disponibles

Descripción	Tipo de Registro	Generales	Tratamiento	Frecuencia Promedio de Registros Aproximada	Periodo	Cantidad de Registros
Cultivos en 9 parcelas distintas pero cercanas en tres, cada parcela es considerada como un tratamiento	Meteorológicos	Día Juliano, Temperatura Máxima, Temperatura Mínima, Temperatura Media, Radiación Solar, Precipitación.		Diario	10/01/1992 al 28/02/1993	414
	Cultivo		Índice de Área Foliar	38		7
	Suelo		Cantidad de agua Promedio en las capas de 0 a 30	26		16
	Balance hídrico del agroecosistema		Drenaje Acumulado,	33		10
			Escoorrentia Acumulada,	27		12

Este conjunto de datos comprende un ciclo completo de cultivo de papa y un período en el cual el suelo se encontraba totalmente desnudo sin ningún tipo de cultivo. Similarmente al experimento de Mixteque, para la variable Contenido de agua en el suelo también se disponen de registros en distintas capas, pero, para efectos del experimento, se promediarán éstas y ese será el valor con el cual se trabajará, en consecuencia se tendrá los registros del contenido de agua en el suelo en la capa de 0-30 cm. Estos datos forman parte del trabajo doctoral de

Sarmiento, (1995). La Figura 3.2 muestra la ubicación geográfica de la localidad de Gavidia, en el estado Mérida.

3.2. **Modelo 1 Base con ET_0 :**

Hipótesis:

La mejor descripción del contenido de agua en el suelo se puede obtener simulando el subproceso de evapotranspiración, con el método de evapotranspiración para cultivos de referencia, con coeficiente de cultivo único durante todo el experimento.

3.2.1 Descripción del Modelo

Los modelos que se presentan en este estudio se encuentran desarrollados en el ambiente de Dinámica de Sistemas Vensim. La elaboración de dichos modelos tendrán como punto de referencia o partida un modelo base el cual, a su vez servirá como primer modelo. Éste modelo de partida o referencia se basa en la siguiente estructura: Se considera una sola capa del suelo de 30 cm la misma se encuentra referenciada como *C1*, en esta capa se observa un flujo de entrada representado por el proceso de *Infiltración* y dos flujos de salida, que son los procesos de *drenaje* y la evapotranspiración (*Evapo*), tal y como se muestra en la Figura 3.3. Respecto a la Evapotranspiración cabe mencionar que se modeliza de acuerdo al modelo ET_{adj} descrito en el capítulo anterior. Esto se basa en el motivo de que en los experimentos descritos, no se tienen garantía de que el agua en el suelo no sea limitante, por tal razón, el valor de referencia ET_0 es multiplicado por un factor de reducción, el cual vendría a ser equivalente al coeficiente K_s que se plantea en la figura 2.7. Es decir, en este modelo base la evapotranspiración es ET_{adj} , pero considerando evaporación y transpiración como un solo flujo, pudiéndose expresar mediante la siguiente expresión ($Et_o * k_c * k_s$)



(Vista ampliada en el anexo 1)

En la estructura principal del modelo Figura 3.3, es de destacar que las variables que encuentran en color rosado claro, corresponden a valores que representan datos de entrada, por otro lado, aquellas que se encuentran en verde, representan funciones que calculan los valores acumulados durante todo el experimento, las demás son cálculos que influyen sobre los sub procesos del balance hídrico y que se encuentran reflejados dentro del modelo. Adicionalmente éste modelo base o de referencia, tiene programado una hoja exclusiva para el cálculo del Porcentaje del Error Cuadrático Medio, y el Índice de Eficiencia de manera que en cada corrida o ejecución del modelo se pueden visualizar la bondad de ajuste entre los valores simulados y los datos disponibles, también tiene programado la presentación de gráficos del contenido de agua del suelo, así como de los procesos de drenaje y escorrentía, lo que permite tener una idea visual del comportamiento de los valores simulados y los datos de cada uno de ellos.

La descripción en detalle de la estructura de las variables de todo el modelo según su clasificación se puede resumir en los siguientes aspectos:

- Datos de entrada o variables exógenas.
- Parámetros.
- Variables de validación.
- Compartimientos.
- Procesos.

En las Tablas 3.4- 3.8 se presenta una descripción detallada de todas las variables según su clasificación. Cabe mencionar que las variables de validación son aquellas que sirven de insumo en el modelo para calcular las medidas de bondad de ajuste, tales como el porcentaje del error cuadrático medio, y el índice de eficiencia de Nash Stutcliffe.

Tabla 3.4. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 1. Descripción de las variables exógenas

Acrónimo	Parámetro	Descripción	Unidad de Medida
Precipitación	Precipitación	Cantidad de lluvia caída por día.	mm
R	Riego	Cantidad de riego suministrado por día.	mm
TempMedia	Temperatura Media	Temperatura diaria promedio del aire	°C
TMax	Temperatura Máxima	Temperatura diaria máxima del aire	°C
TMin	Temperatura Mínima	Temperatura diaria mínima del aire	°C
RHMax	Humedad Relativa Máxima	Es la tasa máxima diaria entre la cantidad de agua que el ambiente actualmente mantiene y la cantidad de agua que podría mantener en la misma temperatura	%
RHMin	Humedad Relativa Mínima	Es la tasa mínima diaria entre la cantidad de agua que el ambiente actualmente mantiene y la cantidad de agua que podría mantener en la misma temperatura	%
RHProm	Humedad Relativa Promedio	Es la tasa promedio diaria entre la cantidad de agua que el ambiente actualmente mantiene y la cantidad de agua que podría mantener en la misma temperatura	%
Rad	Radiación Solar	Cantidad de Energía Disponible promedio diaria para vaporizar agua	MJ M2 día
U2	Velocidad del Viento	Velocidad del Viento medida a 2 m de altura	M/Seg
LAI	Índice de área foliar	Área foliar total por área total de terreno	Adimensional

Tabla 3. 5. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 1. Descripción de los parámetros.

Acrónimo	Parámetro	Descripción	Unidad de Medida
LatRad	Latitud	Latitud de la Localidad donde se realiza el experimento	Radianes
Dia	Dia Juliano	Día del año del 1 al 365 de acuerdo al ciclo del cultivo	día
LAI	Índice de área Foliar	Área foliar por área de unidad de terreno	Adimensional
r1	Coeficientes del Sub proceso de Escorrentía	Proporción de la precipitación neta que se escurre cuando comienza la escorrentía.	%
r22		Umbral de la precipitación neta a partir del cual comienza la escorrentía	mm
CC1	Capacidad de Campo corregida por el factor de pedregosidad	Es la capacidad máxima que tiene el suelo de almacenar agua	cm^3/cm^3
PMP1	Punto de Marchitez Permanente corregida por pedregosidad	Contenido de humedad en la zona de las raíces en la cual las plantas ya no logran absorber se marchitan.	cm^3/cm^3
Pedregosidad	Pedregosidad	Volumen de piedras por unidad de volumen de suelo.	cm^3/cm^3
K	k	Cantidad de Agua interceptada por Unidad de área foliar	m^2
Elevación	Elevación	Elevación por encima del nivel del mar	m
Albedo	Albedo	Superficie de albedo	Adimensional

En la Tabla 3.6 se presenta las variables de validación, las cuales son necesarias para que el modelo pueda calcular los índices de bondad de ajuste de Porcentaje del error cuadrático medio, y el índice de Eficiencia. Índices que servirán para evaluar el ajuste de los modelos y que se encuentran incorporados en todos los modelos presentados en este trabajo. Por otro lado, en la tabla 3.5 se observa que el total de parámetros en este modelo es de (12).

Tabla 3.6. Modelo 1. Variables de validación.			
Acrónimo	Variable	Descripción	Unidad de Medida
<i>PromedioEscorrentia</i>	Promedio de Escorrentia	Promedio de los datos medidos de escorrentía por período en cada tratamiento	<i>mm/dia</i>
<i>DatosEscorrentia</i>	Datos de Escorrentia	Cantidad de mediciones de Escorrentía por tratamiento	--
<i>PromedioDrenaje</i>	Promedio de Drenaje	Promedio de los datos medidos de drenaje por período en cada tratamiento.	<i>mm/dia</i>
<i>DatosDrenaje</i>	Datos de Drenaje	Cantidad de mediciones de drenaje por tratamiento	--
<i>PromedioAgua</i>	Promedio de Agua	Promedio de los datos del contenido de agua en el suelo por tratamiento	<i>mm/dia</i>
<i>DatosAgua</i>	Datos de Agua	Cantidad de mediciones de agua en el suelo por tratamiento	--

Compartimientos o Variables de Estado del Modelo Base:

En la tabla 3.7 se muestran las variables de estado del modelo o Compartimientos, en ella se muestra la ecuación que las representa de manera conjunta con su significado y la respectiva unidad de medida.

Tabla 3. 7. Descripción de los Compartimientos del Modelo 1.			
Definición Compartimiento	Acrónimo	Ecuación	Unidad de Medida
Cantidad de agua en el horizonte del suelo	<i>C1</i>	$\frac{dC1}{dt} = \text{Infiltracion} - \text{Evapo-Drenaje}$	mm

En la tabla 3.8 se muestra los procesos que serán de interés en modelar, solo se hace mención de ellos ya que más adelante se especificará con detalle los mismos.

Tabla 3.8.Descripción de los Procesos del Modelo 1.					
Proceso/ Variable.	Acrónimo	Definición	Ecuación	Unidad de Medida	Fuente
Intercepción	<i>Intercepción</i>	Es la cantidad de la precipitación o el riego que es retenida por el dosel de las plantas y se evapora a partir del mismo sin llegar al suelo	$\text{Min}(\text{Precipitación} + R; K \cdot \text{LAI})$	mm/día	SAHEL
Precipitación Neta	Pn	Cantidad de agua que llega al suelo.	$(\text{Precipitación} + R) - \text{Intercepción}$	mm/día	SAHEL
Escorrentía	<i>Escorrentía</i>	Agua que llega al suelo pero no infiltra sino que se desliza por la superficie del mismo y sale del sistema.	$\text{Max}(0; Pn - r22) \cdot r1$	mm/día	SAHEL
Infiltración	<i>Infiltración</i>	Agua que penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo.	$Pn - \text{Escorrentía}$	mm/día	SAHEL
Evapotranspiración Potencial	ETPO	Transferencia gaseosa potencial de agua en un cultivo estándar bajo condiciones hídricas no limitantes, incluye el agua perdida por intercepción evaporación y transpiración de las plantas.	$ETPO = \frac{0.408 \Delta Rn + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$	mm/día	(Allen, et al. 1998)
Evapotranspiración Real	<i>Evapo</i>	Evapotranspiración que ocurre en condiciones reales teniendo en cuenta que el suelo no siempre se encuentra en estado de saturación.	$\text{ETPO} \cdot \text{Fac_Redu}$	mm/día	--
Drenaje	<i>Drenaje</i>	Es el desplazamiento del agua de la primera capa u horizonte del suelo a capas posteriores del mismo	IF THEN ELSE(C1+Infiltracion>CC, C1+Infiltracion-CC , 0)	mm/día	SAHEL

Desde la perspectiva de la dinámica de sistemas, cada proceso del balance hídrico es considerado como un sub modelo, de manera que la unión de cada sub modelo constituirá el modelo base que servirá como referencia o punto de partida para este estudio.

Ahora se explicará con detalle las ecuaciones de cada sub modelo de este modelo base o modelo de referencia, donde cada sub modelo es a su vez un sub proceso del modelo de balance hídrico. Las ecuaciones de los submodelos de intercepción, Escorrentía, Infiltración, Drenaje, son obtenidas del modelo de Balance Hídrico SAHEL. (Van, et al. 2003, modificado por Metselaar (2003)).

Sub modelo de Intercepción :

El proceso de intercepción se modelizará mediante la siguiente ecuación

$$MIN(Precipitacion+R, k*LAI). \quad \text{Ec. 3. 1}$$

Donde:

Precipitación: Cantidad de lluvia caída durante un día (*mm*).

R: Cantidad de riego suministrado en un día (*mm*).

k: función que pondera la densidad de agua que permanece en las hojas de acuerdo al grado de inclinación que se encuentra en las mismas, y se determina por la siguiente ecuación: m^2

$$k = (1 - e^{(-0.8*LAI)})h. \quad \text{Ec. 3. 2}$$

Donde:

h: Máxima densidad del agua que permanece en las hojas. $h = 0.15mm$

(Jacobs y Heusinkveld, 2005).

LAI: Índice de área foliar del dosel. (*adimensional*)

La ecuación de este sub modelo se deriva del modelo de balance hídrico (SAHEL), donde la cantidad de agua interceptada será la mínima cantidad entre

las entradas de agua al sistema, producida por la precipitación más el riego, y el producto de la cantidad de agua que puede ser retenida por unidad de área foliar, por el índice de área foliar, este último término refleja la cantidad de agua que puede permanecer en las hojas y que luego será evaporada. Si la precipitación más el riego es menor que el producto del coeficiente por el índice de área foliar, implica que toda el agua caída sobre la hoja será interceptada, por otro lado, si el agua que cae producto de la precipitación más el riego es mayor que la que es capaz de retener la hoja, sólo se interceptará el agua que las hojas son capaces de retener en su superficie.

Sub Modelo de escorrentía:

Para este sub modelo se utilizará la siguiente ecuación:

$$\text{Max}(0; (P_n - r_{22}) * r_1) \quad \text{Ec. 3. 3}$$

Donde:

r_{22} : Umbral de la precipitación neta a partir del cual comienza la escorrentía. (mm)

r_1 : Proporción de la Precipitación neta que se escurre cuando comienza la escorrentía. (adimensional)

Esta ecuación considera que no hay escorrentía hasta que ya haya formado una lámina de agua sobre la superficie del suelo (r_{22}) y a partir de este umbral lo que escurre es una proporción fija de la precipitación neta (r_1). Cabe mencionar que los valores de r_1 y r_{22} son valores sujetos a calibración en ambos experimentos planteados en este estudio.

Sub modelo de infiltración:

Dado por la diferencia entre la Precipitación neta (P_n) y la Escorrentía:

$$\text{Infiltración} = P_n - \text{Escorrentía} \quad \text{Ec. 3. 4}$$

Sub modelo de drenaje:

IF THEN ELSE($C1 + Infiltracion - Evapo > cc1$, $C1 + Infiltracion - Evapo - cc1$, 0).

Ec. 3. 5

Donde:

C1: Contenido de agua en el suelo en su capa única de 0 a 30 cm. ($mm * dia^{-1}$)

Evapo: Subproceso de Evapotranspiración (mm)

cc1: Capacidad de Campo corregida por el factor de pedregosidad cm^3/cm^3

El drenaje en este caso se modelará con una función condicional, la cual define que el drenaje será la cantidad de agua que se encuentra en la capa única del suelo determinada por la variable *C1* más el agua que le entra a través del sub proceso de infiltración menos el agua que sale de la capa por el sub proceso de evapotranspiración (*Evapo*), si el agua que se encuentra en el compartimiento es mayor que el agua que es capaz de retener el suelo determinada por la capacidad de campo *cc1*, entonces la diferencia o el exceso entre el agua del compartimiento y la capacidad de campo *cc1*, es la que será drenada. En caso contrario no hay drenaje, ya que el agua que se entra en el compartimiento, permanece en el mismo.

Subproceso de evapotranspiración potencial:

Existen diversas formas de modelar este componente o sub proceso de evapotranspiración, sin embargo en este primer modelo, (modelo base), éste componente se modelizará, tal y como se encuentra en Allen et al. (1998) que se refiere a la evapotranspiración de cultivos de referencia, la cual queda expresada mediante la siguiente ecuación:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ec. 3. 6}$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de cultivo de referencia (mm)

R_n : Radiación Solar Neta en la superficie de referencia ($MJm^{-2}dia^{-1}$).

G : Densidad del flujo de calor del suelo $MJm^{-2}dia^{-1}$. $G \approx 0$

T : Temperatura media del aire diaria a una altura de 2 m ($^{\circ}C$).

u_2 : Velocidad del viento a una altura de 2 m (ms^{-1}).

(e_s) : Presión de vapor de saturación (KPa).

(e_a) : Presión de vapor Actual (KPa).

$(e_s - e_a)$: Déficit de presión de vapor de saturación KPa

Δ : Pendiente de la curva de presión de la temperatura ($KPa^{\circ}C^{-1}$).

γ : Constante psicrométrica ($KPa^{\circ}C^{-1}$).

Subproceso de evapotranspiración real:

Es la evapotranspiración que ocurre en condiciones reales, teniendo en cuenta que el suelo no siempre se encuentra en estado de saturación, un suelo se encuentra saturado cuando todos sus macroporos se encuentran llenos de agua.

Para el cálculo de la evapotranspiración real se utiliza un factor de reducción que oscila entre cero y uno, y que multiplica a Et_o . Este factor se calcula en función del porcentaje de agua disponible que es la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

$$Min\left(\left(\frac{(C1 - pmpl)}{(cc1 - pmpl)}\right), 1\right) \quad \text{Ec. 3. 7}$$

Donde:

$C1$: Contenido de agua en el suelo en su capa única de 0 a 30 cm. $mm * dia^{-1}$

$pmp1$: Punto de marchitez permanente, corregida por el factor de pedregosidad. cm^3/cm^3

$cc1$: Capacidad de campo, corregida por el factor de pedregosidad. cm^3/cm^3

Esta ecuación limita linealmente la evapotranspiración, desde la capacidad de campo (factor=1), hasta el punto de marchitamiento (factor=0). No considera que pueda haber pérdidas gaseosas por debajo del punto de marchitamiento.

3.2.2 Calibración del Modelo

En el proceso de calibración del modelo se escogieron los parámetros para los cuales no se tiene un valor de referencia. Además también aquellas que ayuden a mejorar el ajuste de las variables de respuesta o salida del modelo, tomando en cuenta el Porcentaje del Error Cuadrático Medio y el índice de Eficiencia para obtener su valor final. Para este modelo los valores a ser calibrados según el criterio presentado anteriormente son los coeficientes $r1$ y $r22$ descritos, y que intervienen directamente en el proceso de Escorrentía.

La calibración se realizó usando el módulo de calibración “*Begin Optimization*” disponible en *Vensim*. Este módulo se basa en múltiples corridas del modelo, cada una de ellas con una serie de combinaciones diferentes en los valores de los parámetros, de manera que se pueda encontrar la mejor coincidencia de los valores simulados por el modelo con los datos que se disponen. Este módulo de optimización del *Vensim*, posee la ventaja que no tiene límites entre el número de parámetros a calibrar. Para la ejecución de la optimización, el *Vensim* cuenta con un motor de búsqueda denominado “*Powell hill climbing*” que permite encontrar en un espacio paramétrico definido por el usuario los valores de los parámetros que conlleven a la solución óptima o deseada por el usuario. Dentro de las opciones que presenta el módulo de calibración, está la activación de una función de penalización denominada *Pay Off Function*, la cual indica que tan cerca se

encuentra los valores simulados respecto a los datos. Otra de las opciones que ofrece este modulo es el de asignarles peso o ponderaciones a las variables que se desean calibrar, de manera que, el peso puede jerarquizar aquellas variables de acuerdo a su importancia. Cuando no se tiene referencia alguna de cual debe ser dicho peso, un valor de referencia puede ser el inverso de la varianza de las variables que se desean calibrar.

El espacio paramétrico para los parámetros fueron: $0 \leq r1 \leq 1$ (al ser un porcentaje), y $0 \leq r22 \leq 10$.

La calibración de estos parámetros mencionados anteriormente se realizó de forma conjunta tomando en cuenta aquellos valores que tuvieran el mejor ajuste de los valores del modelo con los datos disponibles en cuanto al sub proceso de escorrentía. En el caso de Mixteque por ser un experimento donde cada ladera posee características distintas estos parámetros fueron calculados por tratamiento, es decir se obtuvo un juego de valores para cada una de las tres laderas.

3.2.3 Análisis de Sensibilidad:

El análisis de sensibilidad se realizó en el primer modelo de balance hídrico y consistió en la modificación de los parámetros que intervienen en el proceso de la escorrentía, para luego observar como es el cambio en la respuesta en las variables de contenido de agua en el suelo y escorrentía, recordando que éste último proceso se encuentra definido por la ecuación:

$$\text{Escorrentía: } \text{Max}(0; (P_n - r22) * r21) \quad \text{Ec. 3.8}$$

En este caso los parámetros a ser estudiados son los siguientes:

$r1$: Proporción de la Precipitación neta que se escurre cuando comienza la escorrentía. (*adimensional*)

r_{22} : Umbral de la precipitación neta a partir del cual comienza la escurrentía.

(mm)

El motivo por el cual se escogen estos parámetros, parte del hecho de que no se tiene algún valor de referencia, en consecuencia, se quiere determinar que tan sensible es el modelo a cambios porcentuales en los valores de los parámetros que han sido producto de una calibración.

3.3. *Modelo 2 Balance hídrico con coeficiente de cultivo variable en el tiempo.*

Hipótesis

La mejor descripción del contenido de agua en el suelo se puede obtener simulando el subproceso de evapotranspiración ponderado con coeficiente de cultivo variable de acuerdo a la etapa de desarrollo del cultivo.

3.3.1 Descripción del Modelo

Este segundo modelo de balance hídrico es similar al modelo 1 presentado anteriormente, salvo que el sub proceso de evapotranspiración es calculado considerando un coeficiente de cultivo variable en el tiempo, según los planteamientos de Allen et al. (1998).

En la Figura 3.4 se observa la estructura del modelo 2, se observa el recuadro en rojo que el coeficiente de cultivo K_c es influenciado por diferentes parámetros.

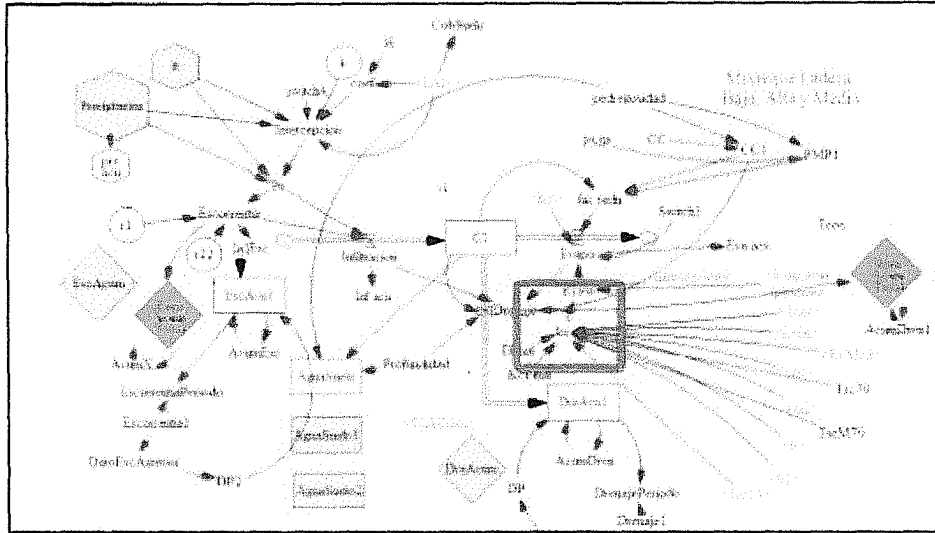


Figura 3. 4 Estructura Modelo de Balance Hídrico 2

(Vista ampliada en el anexo 2)

En este sentido, la expresión mediante el cual se calcula el coeficiente del cultivo se encuentra determinada por el siguiente pseudo código:

```
IF THEN ELSE( (Time>0 :AND:Time<=Tsc10[Ladera]), KcIni[Ladera], IF THEN
ELSE( Time>Tsc10[Ladera]:AND:Time<=Tsc70[Ladera]
], m[Ladera]*Time+b[Ladera], IF THEN
ELSE(Time>Tsc70[Ladera]:AND:Time<=TscM70[Ladera], KcMed[Ladera], IF
THEN ELSE(Time
>TscM70[Ladera]:AND:Time<=Tcos[Ladera], m2[Ladera]*Time+b2[Ladera], IF
THEN ELSE(Time>=TFinal[Ladera], KcFinal[Ladera] , :NA: ))))
```

Este pseudo código se puede interpretar de la siguiente manera: si el tiempo se encuentra entre cero y **Tsc10** entonces el valor del coeficiente del cultivo será **KcIni**, de lo contrario si el tiempo se encuentra entre **Tsc10** y **Tsc70** entonces determine una recta cuyos puntos serán; (**TSC10, Kcini**) y (**TSC70, Kcmed**), de lo contrario si tiempo se encuentra entre **Tsc70** y **TscM70** entonces el coeficiente del cultivo será **KcMed**, de lo contrario si el tiempo se encuentra entre **TscM70** y **Tcos** entonces se determina una recta que pasa por los siguientes puntos (**TscM70, KcMed**) y (**Tcos y KcMed**), de lo contrario el valor será **KcFinal**. En la Figura 3.5 se puede observar la distribución de los valores del coeficiente del cultivo contra el tiempo, en él se puede observar las nuevas variables que tiene el modelo, y las mismas servirán para el cálculo de los coeficientes del cultivo.

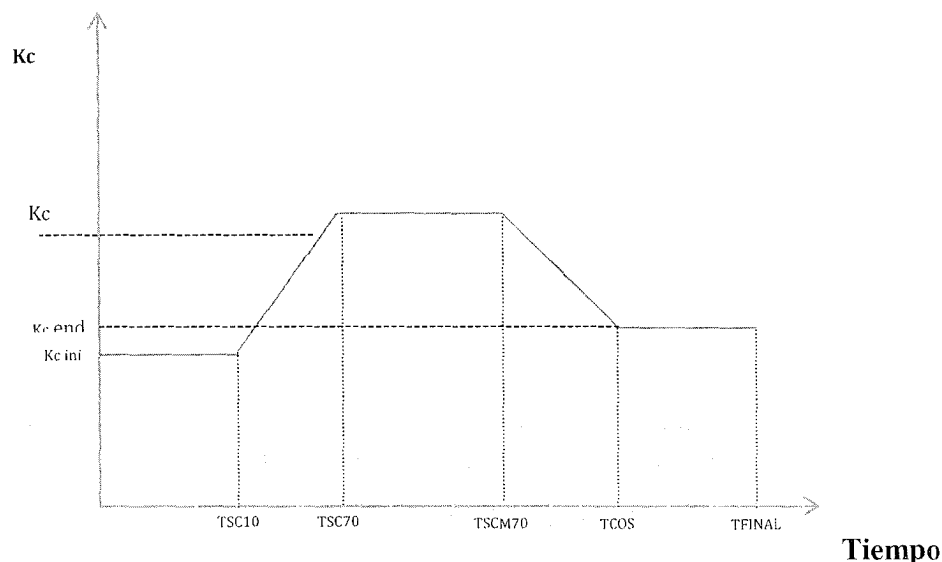


Figura 3. 5 Comportamiento del coeficiente del cultivo a lo largo de las diferentes etapas de su desarrollo .

Donde:

TSC10: Tiempo en el cual la cobertura del cultivo llega al 10%. (*dia*)

TSC70: Tiempo donde inicialmente el cultivo alcanza el 70% de Cobertura. (*dia*)

TSCM70: Tiempo donde el cultivo se desarrolla desde el 70% de cobertura y empieza a decrecer hasta llegar nuevamente al 70% de cobertura. (*dia*)

TCOS: Tiempo donde se recoge la cosecha y termina el ciclo del cultivo. (*dia*)

TFINAL: Tiempo donde termina el experimento en cada ladera. (*dia*)

Parámetros del Modelo:

Además de los parámetros del modelo base, en este modelo se añaden aquellos que intervienen en el cálculo de las etapas del desarrollo del cultivo. Por otro lado en este grupo de parámetros se cuenta también con los coeficientes del cultivo los cuales se describen con detalle más adelante. En resumen este modelo cuenta

con los parámetros del modelo anterior, más los ocho parámetros que intervienen en el cálculo de los coeficientes del cultivo, para un total de 20 parámetros.

Compartimientos o variables de estado del Modelo 2.

Son los mismos presentados en el Modelo anterior.

Procesos:

Todos los procesos del modelo 1 se simulan de la misma manera excepto el proceso de evapotranspiración que ahora corresponde al ET_c descritos en la sección anterior.

Calculo de los coeficientes del Cultivo:

Los coeficientes del cultivo se calcularon de acuerdo a cada ladera en el experimento de Mixteque y también de acuerdo a cada una de las etapas de desarrollo del cultivo definidas anteriormente. Para realizar el cálculo se debe disponer de los datos de variación del índice de área foliar (LAI) a lo largo del desarrollo del cultivo.

Coefficiente del cultivo inicial ($k_{c,ini}$)

Para el cálculo del Coeficiente inicial del cultivo, en Allen, et al. (1998), se presenta unos valores tabulados de acuerdo al tipo del cultivo, sin embargo, estos valores son aproximaciones y deberían ser usados para estimar la evapotranspiración de forma preliminar o en estudios de planificación (Allen, et al. 1998, p.114).

Para estimaciones más certeras del coeficiente inicial del cultivo, se recomienda tomar en cuenta factores como:

- Tiempo entre eventos de lluvia.

Ya que en esta etapa inicial la evapotranspiración se da en forma de evaporación del suelo, debido a que el mismo se encuentra en gran parte descubierto y el cultivo tiene poca cobertura (en particular tiene menos del 10%). Estimaciones certeras deberían considerar la frecuencia de las precipitaciones durante el período inicial.

- Poder evaporativo de la atmósfera.

El valor del coeficiente del cultivo inicial se ve afectado por el poder evaporativo de la atmósfera es decir por la ET_o , el más alto poder evaporativo de la atmósfera hará que más rápido se seque en suelo por lo que el valor del coeficiente inicial será más alto.

- Magnitud de los eventos de lluvia.

El valor del coeficiente del cultivo en la etapa inicial se verá afectado ya que la cantidad de agua que se encuentra en la superficie del suelo lista para ser evaporada estará en función de la cantidad de agua que cae en cada evento de lluvia. (Allen et., al 1998, p.115).

Cálculo del Coeficiente de Cultivo Medio (k_{cMed})

Para la determinación del coeficiente del cultivo en la etapa media (K_{cmed}) es de destacar que Allen, et al. (1998), presenta unos valores tabulados de acuerdo al tipo del cultivo. Estos valores tabulados, son coeficientes que corresponden a cultivos que tienen una cobertura completa o tienen un índice de área foliar igual a 3.

Cálculo del Coeficiente de Cultivo Final (k_{cEnd})

En esta etapa del cultivo se utilizarán directamente los valores presentados en Allen, et al. (1998).

3.4. **Modelo 3 ET_0 . Coeficiente Dual.**

Hipótesis:

La mejor descripción del contenido de agua en el suelo se puede obtener particionando el subproceso de evapotranspiración en dos flujos: evaporación del suelo, y transpiración de las plantas.

3.4.1 Descripción del Modelo

La definición de este tercer modelo será similar al modelo anterior, y sólo se diferenciará, en que el cálculo del subproceso de evapotranspiración considerará por separado la evaporación desde el suelo y la transpiración de las plantas, utilizando un coeficiente dual (ET_{0_Dual}), según los lineamientos de Allen et al. (1998).

En la Figura 3.6 se puede observar la estructura del modelo 3. Es de notar que ahora el compartimiento C1 presenta flujos de salida: drenaje, evaporación del suelo y transpiración de las plantas.

Adicionalmente en este modelo se incorpora el cálculo de la evapotranspiración en los períodos improductivos, que en los experimentos desarrollados en este trabajo consiste a aquellos días posteriores a la cosecha del cultivo, ya que en este período el suelo puede tener restos de vegetación muerta influyendo de esta manera en el cálculo de la evaporación del suelo, ya que una vez que el suelo contenga en su superficie restos de materia vegetal muerta, la misma reduce la evaporación del suelo.

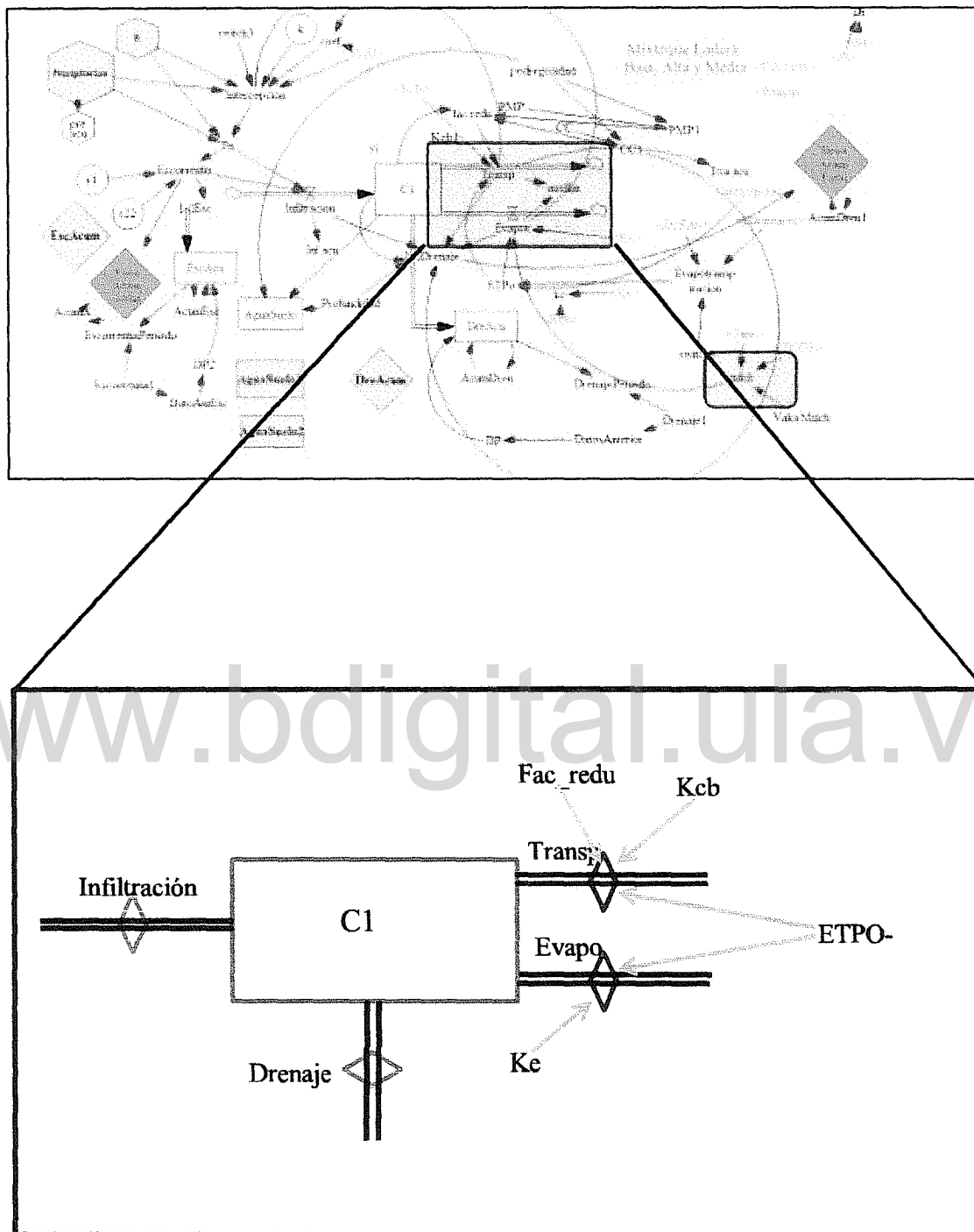


Figura 3. 6 Estructura del Modelo de Balance Hídrico 3

(Vista ampliada en el anexo 3)

Cuando se aplica el procedimiento del coeficiente dual, el cual considera un balance separado del agua en la capa superficial del suelo, se deberá reducir la magnitud del componente de evaporación ($K_e ETo$) en alrededor un 5% por cada 10% de la superficie del suelo cubierta por el mantillo orgánico. No se debe cambiar el valor de K_{cb} . (Allen et al. 1998,p.196).

Debido a que en ambos experimentos se quiere introducir este factor después del tiempo de la cosecha, no se puede calcular o introducir este factor en función de la cobertura del suelo ya que la misma es cero (0), por lo que en este caso y para ambos experimentos, se reducirá el componente de evaporación en un 15% durante este período. Con esta incorporación se pretende tener una mejor estimación de la evapotranspiración durante este período en el cual no existe cobertura del cultivo y el suelo se encuentra desnudo pero con restos de necromasa de los cultivos cosechados.

Parámetros del Modelo:

Debido a la estructura presentada para el cálculo de la evapotranspiración con el enfoque del coeficiente dual, en este modelo los parámetros son los mismos presentados en el Modelo base, pero en este caso se le adicionan los coeficientes basales de la transpiración. Los cuales se listan a continuación:

$K_{cb_{ini}}$: Coeficiente basal del cultivo en su etapa inicial.(*adimensional*)

$K_{cb_{Med}}$: Coeficiente basal del cultivo en su etapa media.(*adimensional*)

$K_{cb_{End}}$: Coeficiente basal del cultivo en su etapa final. (*adimensional*)

Para la determinación de estos coeficientes se tomarán como referencia aquellos presentados por Allen et al. (1998,p.137).

Por otro lado, se le adicionan los días en los cuales corresponden al comienzo y culminación de las etapas del cultivo, que son los siguientes:

TSC10: Tiempo en el cual la cobertura del cultivo llega al 10%. (*dia*)

TSC70: Tiempo donde inicialmente el cultivo alcanza el 70% de Cobertura. (*dia*)

TSCM70: Tiempo donde el cultivo se desarrolla desde el 70% de cobertura y empieza a decrecer hasta llegar nuevamente al 70% de cobertura. (*dia*)

TCOS: Tiempo donde se recoge la cosecha y termina el ciclo del cultivo. (*dia*)

TFINAL: Día en la cual termina el experimento. (*dia*)

Por otro lado, este modelo posee el parámetro

ValorMulch: Proporción de la evapotranspiración que se pierde por efecto de la presencia del mulch (residuos de cultivo) después de la cosecha.

Es decir este modelo contiene 21 parámetros.

Compartimientos o Variables de Estado del Modelo 3.

Los compartimientos siguen siendo los mismos al modelo anterior.

Procesos:

Recordando que el cálculo de la evapotranspiración con el coeficiente dual se encuentra dado por la siguiente expresión:

$$ET_c = (K_{cb} + K_e)ET_o \quad \text{Ec. 3. 9}$$

Donde:

(K_{cb}): Coeficiente basal de transpiración del cultivo. (*adimensional*)

(K_e): Coeficiente de evaporación del suelo. (*adimensional*)

Calculo del coeficiente de Evaporación (K_e):

El coeficiente de evaporación se encuentra definido por la siguiente expresión:

$$K_e: \text{Min}(k_r(K_{c_{max}} - K_{cb}), f_{ew}K_{c_{max}}) \quad \text{Ec. 3. 10}$$

Donde:

K_e : Coeficiente de evaporación en el suelo. (*adimensional*)

K_{cb} : Coeficiente basal de transpiración. (*adimensional*)

K_{cMax} : Valor máximo del coeficiente K_c después del riego o lluvia. (*adimensional*)

Representa el límite superior de la evaporación y la transpiración que puede ocurrir en una superficie cultivada, valor que es impuesto para reflejar los límites naturales definidos por la cantidad de energía disponible representados en la diferencia del balance de energía. Y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_{cmax} = \text{Max} \left(\left\{ 1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} + 0.05\} \right)$$

Ec. 3. 11

Donde:

h : altura máxima promedio de las plantas durante el periodo de calculo (m)

K_{cb} : Coeficiente basal de transpiración. (*adimensional*)

f_{ew} : Fracción del suelo que se encuentra expuesta y humedecida, es decir la fracción de la superficie del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación. (*adimensional*)

K_r : Coeficiente de reducción de la evaporación, dependiente del agua acumulada evaporada, de la capa superficial del suelo. (*adimensional*)

En este caso la evaporación sucede en dos etapas la primera de ellas determinada por la cantidad de energía disponible que es cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda, en este caso el valor del coeficiente de reducción es 1, la otra cuando la tasa de evaporación se reduce gradualmente, en este caso es cuando el contenido de agua en el suelo empieza a ser limitante y el valor del coeficiente disminuye hasta llegar a cero, que es cuando se agota la totalidad del agua.

Este coeficiente depende de varios factores tales como:

Máxima Cantidad de agua que puede ser evaporada (TEW):

$$TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.50WP)Z_e \quad \text{Ec. 3. 12}$$

Donde:

θ_{FC} : Capacidad de Campo. cm^3/cm^3

wp : Punto de marchitez permanente. cm^3/cm^3

Z_e : Profundidad de la capa del suelo que es sujeta al secado a través de la evaporación.(m)

De aquí que el coeficiente de reducción de evaporación se puede calcular de la siguiente manera:

$$K_r: \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \quad \text{Ec. 3. 13}$$

Donde:

$D_{e,i-1}$: Lámina acumulada de evaporación (agotamiento) en la capa superficial del suelo al final del día i-1 (el día anterior) [mm]

REW : Lámina acumulada de evaporación al final de la etapa 1 [mm]

Coeficiente Basal:

Para el cálculo del coeficiente basal de Transpiración, se usará los valores tabulados por Allen et al. (1998, p.137).

3.5. Modelo 4 Balance Hídrico ponderado por la Cobertura del Suelo

Hipótesis:

La mejor descripción del contenido de agua en el suelo se puede obtener particionando el subproceso de evapotranspiración en dos flujos: evaporación del suelo, y transpiración de las plantas, a su vez, estos dos flujos se encuentran ponderados por la cobertura del suelo.

3.5.1 Descripción del Modelo

Este cuarto modelo, sigue con la dinámica de calcular el subproceso de evapotranspiración, separando los subprocesos de transpiración de las plantas, y evaporación del suelo, determinados de la siguiente manera:

Transpiración de las plantas:

$$Transp = ET_0 * Fac_{Redu} * Cob_Suelo \quad \text{Ec. 3. 14}$$

Evaporación del Suelo:

$$Penman*(1-Cob_Suelo)*mulch*Fac\ Redu2 \quad \text{Ec. 3. 15}$$

Donde:

Penman: Ecuación de evaporación *Penmman Monteith* para suelo desnudo (mm)

Cob_Suelo: Fracción de la superficie del suelo cubierta por el cultivo. (adimensional)

Fac_{Redu}: Factor de reducción de la evapotranspiración potencial debido a la reducción del agua disponible para transpirar. (adimensional)

Fac Redu2: Factor de reducción de la evapotranspiración potencial debido a la reducción del contenido de agua en el suelo. (adimensional)

ET₀: Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar. (mm)

En este modelo se puede destacar las siguientes características:

- Calcula los dos subprocesos de evaporación y transpiración por separado.
- Los dos sub procesos se encuentran ponderados por la fracción de la cobertura del suelo por el cultivo.
- Calcula la evaporación para suelo desnudo determinada por *Penmman Monteith*.

En este caso en el sub proceso de evaporación del suelo se va a calcular con la ecuación de *Penmman Monteith* para el suelo desnudo, en ese sentido Wallace

(2000), hace referencia que el cálculo la evaporación para suelo desnudo utiliza la siguiente expresión:

$$\lambda E s_0 = \frac{\Delta(R_{ns} - G_s) + \rho c_p D / r_a}{\Delta + \gamma} \quad \text{Ec. 3. 16}$$

Donde:

G_s : Calor térmico del suelo. $Mj m^2 dia^{-1}$

λ : Calor latente de vaporización. $Mj Kg^{-1}$

R_{ns} : Radiación solar neta. $Mj m^2 dia^{-1}$

D : Déficit de presión de vapor del aire. kPa

ρ : Densidad del aire. $kg m^3$

c_p : Calor específico del aire en presión constante. $Mj Kg^{-1} ^\circ C^{-1}$

r_a : Resistencia aerodinámica a la evaporación sm^{-1}

$$r_a = \frac{\ln^2 \{ (z) / z_0 \}}{k^2 u} \quad \text{Ec. 3. 17}$$

Donde:

z : Altura del cultivo de referencia. (m)

z_0 : Longitud de la rugosidad. (0.01) para suelo desnudo. (m)

k : Constante de Von Karman = $0.41(adimensional)$

u : Velocidad del viento a una altura z : (m)

En la Figura 3.7 se puede observar la estructura general del cuarto modelo de balance hídrico en el cuadro enmarcado se observa las variables que forman las ecuaciones adicionales que se requieren para el cálculo de la evaporación del suelo cuando éste se encuentra desnudo, entre ellas *Penman*, *CobSuelo*, y *Fac_Reduo2*, ésta último es el factor de reducción de la evaporación potencial debido a la reducción del contenido de agua en el suelo, y tiene la misma expresión que la que se ha desarrollado en todos los modelos, es decir, es una ecuación que está en función de la capacidad de campo, punto de marchitez permanente, y del contenido de agua en el suelo.

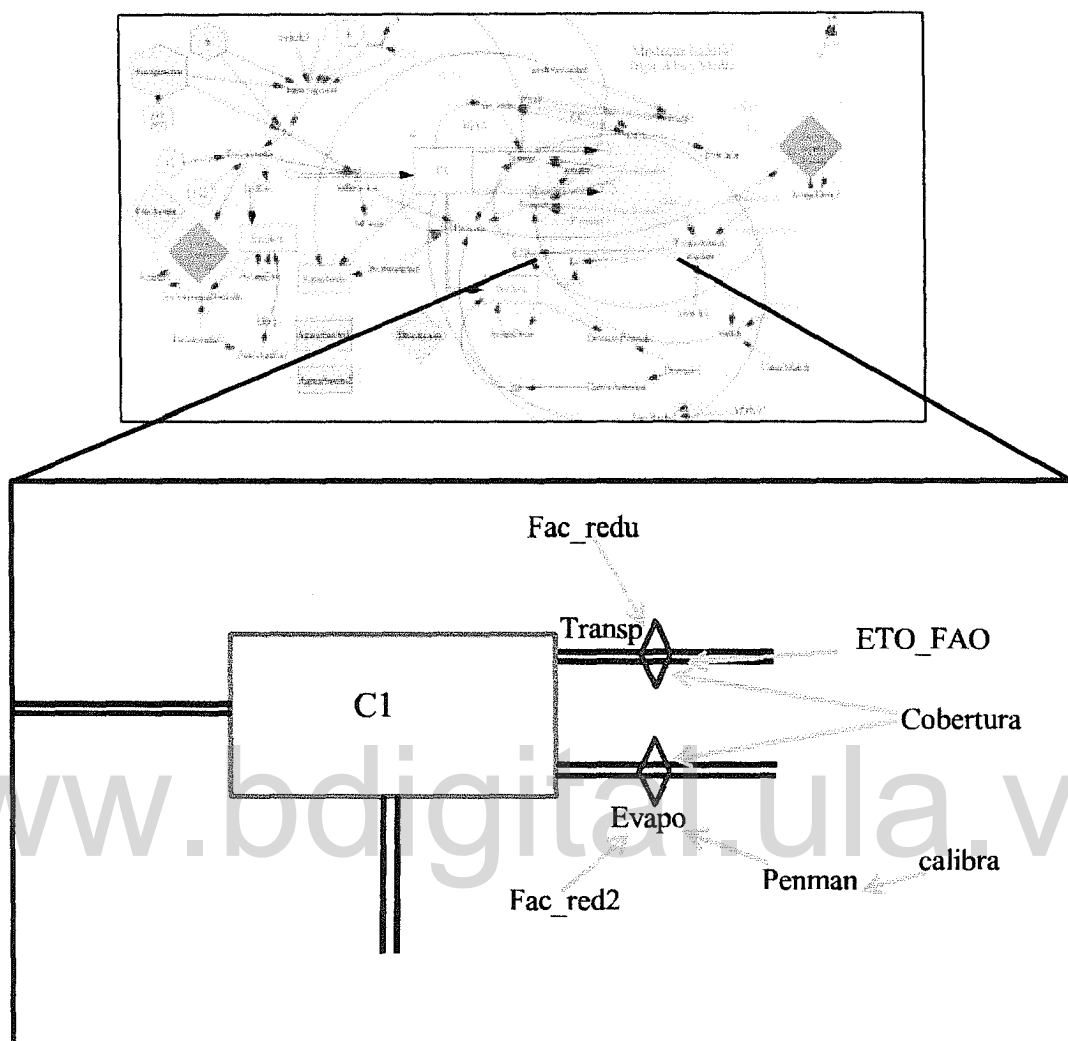


Figura 3. 7 Estructura del Modelo de Balance Hídrico 4.

(Vista ampliada en el anexo 4)

Parámetros del Modelo:

A parte de poseer los mismos parámetros del modelo base, en este modelo se agregan algunos parámetros que son necesarios para el cálculo de la evapotranspiración para el suelo desnudo y son los siguientes:

z_0 : Longitud de la rugosidad. 0.01 para suelo desnudo. (m)

k : Constante de Von Karman = 0.41(adimensional)

ρ : Densidad del aire. Kgm^3

c_p : Calor específico del aire en presión constante. (kPa)

Por otro lado, posee los siguientes parámetros:

AltInic: Altura de la planta en su etapa inicial del cultivo. (m)

AltMed: Altura de la planta en su etapa media del cultivo. (m)

AltFin: Altura de la planta en su etapa final del cultivo. (m)

Calibra: Valor calibrado que hace aumentar la evaporación de suelo desnudo, ya que por las características de este tipo de suelo de manera conjunta con su albedo en teoría su evaporación tiene que ser más alta que la de un suelo con algún porcentaje de cobertura. (*adimensional*)

Por lo que en este último modelo el total de parámetros será de 19

Compartimientos o Variables de Estado del Modelo 4

Son las mismas que las presentadas en los modelos anteriores.

Procesos:

Adicional a los procesos que se muestran en el modelo anterior, en este modelo se agrega el proceso de la evaporación del suelo desnudo que se encuentra al principio de la descripción de este modelo.

3.6. Medidas de Bondad de Ajuste en Vensim

Todos los modelos presentados en este trabajo, tienen incorporados dos submodelos adicionales que se encuentran referidos a dos medidas de bondad de ajuste, las cuales son:

Índice de Eficiencia del Modelo Nash y Sutcliffe: y Porcentaje del error cuadrático medio.

La figura 3.8 muestra el esquema construido en *Vensim*, para el cálculo del porcentaje del error cuadrático medio, y el índice de eficiencia de *Nash* y *Sutcliffe*. Aunque el esquema mostrado se refiere a la variable del contenido de agua en el suelo, dicho esquema es el mismo para las variables de escorrentía y drenaje cambiando sólo los parámetros necesarios que son propios de cada variable. Para

el caso en particular del contenido de agua en el suelo, las variables utilizadas para su cálculo se describen a continuación:

PromedioAgua: Promedio de los valores de los datos del contenido de agua en el suelo.

DatosAgua: Cantidad de observaciones del contenido de agua en el suelo.

AguaSuelo: Datos del contenido de agua en el suelo.

AguaSuelo1: Valores simulados de agua en el suelo

DifAgua: Diferencia entre los valores simulados y los datos elevados al cuadrado.

ECMAgua: Porcentaje del error cuadrático medio.

Eficiencia Agua: Índice de eficiencia de Nash y Stutcliffe.

En consecuencia, cada vez que se ejecutan las simulaciones o corridas de los modelos, se calculan a su vez las dos medidas de bondad de ajuste mencionadas. Las mismas se encuentran reflejadas en el último valor de la serie mostrada, en las variables (*ECMAgua* y *Eficiencia Agua*).

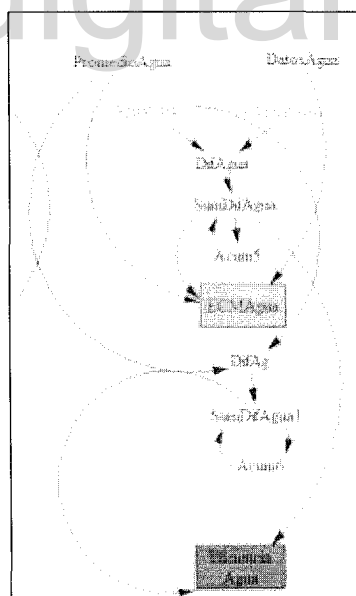


Figura 3. 8. Esquema general para el cálculo del porcentaje del error cuadrático medio del contenido del agua en el suelo.

4. Capítulo IV: Resultados

En este capítulo se mostrarán los resultados que son producto de las corridas de los modelos planteados en el capítulo anterior: Dichas corridas o simulaciones son acompañadas con gráficos y el cálculo de algunas medidas de bondad de ajuste, que indican, que tan buena ha sido la simulación. Todo esto ha sido aplicado a los experimentos de Gavidia y Mixteque respectivamente.

4.1 Modelo 1: Base con ET_0 :

4.1.1. Balance hídrico de Mixteque

La Figura 4.1 muestra la distribución de la precipitación acumulada durante los días que duró el experimento. La precipitación diaria promedio para la ladera baja media y alta fue de: 1,75 mm; 1,85 mm; y 1,93 mm; respectivamente, proporcionando indicios de que la altitud ejerce un efecto en la precipitación caída en cada ladera, es decir que a mayor altitud, mayor será también la precipitación caída. En consecuencia la ladera donde se registró mayor precipitación acumulada en la duración del experimento fue en la ladera alta con un total de 296,35 mm, seguida por la ladera media con 282,26mm y por último la ladera baja. Con 267,72 mm, durante 153 días.

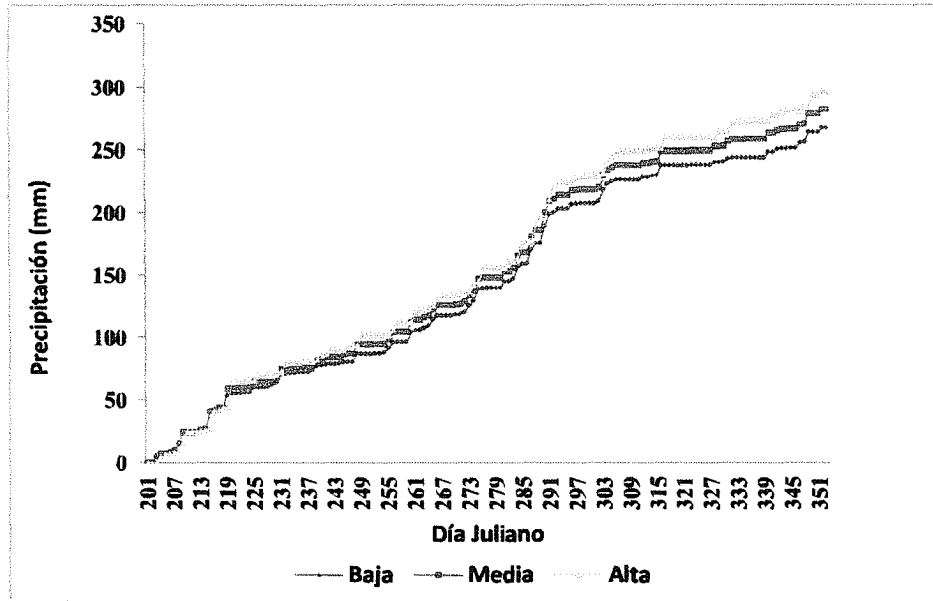


Figura 4. 1. Balance hídrico de Mixteque. Precipitación Acumulada durante el experimento según Laderas.

En lo que se refiere al riego aplicado en este experimento, en la Figura 4.2 se observa que la mayor aplicación al riego se produjo en la ladera media con un riego acumulado durante el experimento de 209 mm, seguido por la ladera alta con un total de 132 mm y por último la ladera baja con 127 mm.

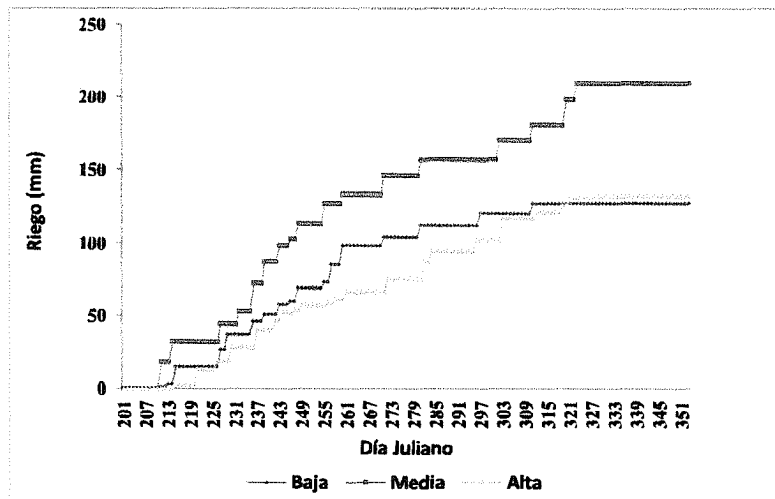


Figura 4. 2. Balance hídrico de Mixteque. Distribución del riego acumulado durante los días del experimento según laderas.

La tabla 4.1 muestra algunos registros tomados del suelo en el experimento de Mixteque, se puede notar que la pedregosidad es mayor en la ladera alta, seguida luego de la ladera media y la menor pedregosidad la posee la ladera baja. En lo que se refiere a la capacidad de campo y punto de marchitez permanente ocurre una relación inversa, es decir, a menor altitud mayor capacidad de campo y mayor punto de marchitez permanente, en consecuencia la ladera con menor altitud será aquella que tiene mayor capacidad de retención de agua y a su vez será la que mayor punto de marchitez permanente posea.

Tabla 4. 1. Balance hídrico de Mixteque. Valores de pedregosidad, capacidad de campo punto de marchitez permanente de acuerdo a las laderas					
Laderas/ Variables del Suelo	Proporción de Pedregosidad	Capacidad de Campo cm^3/cm^3	Capacidad de Campo Corregida por pedregosidad cm^3/cm^3	Punto de Marchitez Permanente cm^3/cm^3	Punto de Marchitez Permanente corregido por pedregosidad cm^3/cm^3
Baja	0,146	0,38	0,325	0,250	0,214
Media	0,309	0,36	0,249	0,133	0,092
Alta	0,416	0,28	0,164	0,093	0,054

La tabla 4.2 presenta la distribución de la precipitación (mm) durante los meses que duró el experimento, en ella se observa que el mes de octubre fue donde se registró la mayor cantidad de lluvia caída, obteniéndose un promedio por ladera de 100,89 mm. Por otro lado, dentro de cada ladera la variabilidad no pareciera experimentar diferencia significativa, ya que se obtienen valores que van desde 27,05 mm hasta 29,13 mm.

Tabla 4. 2. Balance hídrico de Mixteque. Precipitación mensual (mm) año 2001				
Meses/Laderas	Baja	Media	Alta	Promedio
Jul	24,38	24,70	25,00	24,69
Ago	55,06	60,10	65,00	60,05
Sep	45,96	49,10	47,00	47,35
Oct	98,06	100,60	104,00	100,89
Nov	20,90	23,80	23,80	22,83
Dic	23,37	23,96	24,56	23,96
Promedio	44,62	47,04	48,23	
Desviación	27,05	27,74	29,13	

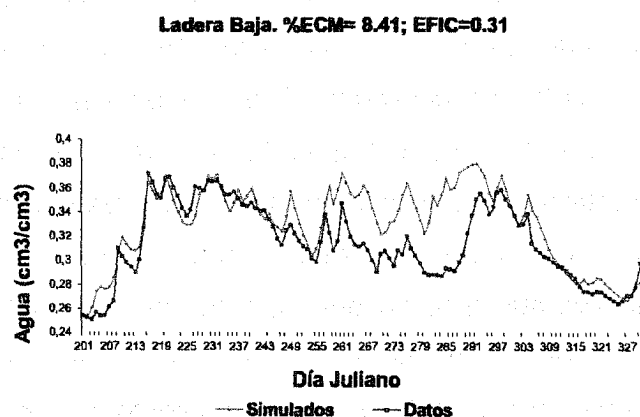
Calibración del Modelo Base con ET_0 Balance hídrico de Mixteque

La tabla 4.3 muestra los valores de los parámetros que fueron expuestos a la calibración y de los cuales no se tiene algún valor de referencia en la literatura especializada, se observa que los mismos son valores cercanos a cero, exceptuando el valor de la Ladera Media en el parámetro (r_{22}), definido como el Umbral de la precipitación neta a partir del cual comienza la escorrentía. Estos valores de r_{22} de cero que se reflejan en la Ladera Baja y Alta, no corresponden con valores acordes a la realidad, ya que indican que no sería necesario que se formara una lámina de agua sobre la superficie antes de iniciar el proceso de escorrentía. Sin embargo dichos valores son aquellos que mejor ajuste tienen en lo que se refiere al contenido de agua en el suelo y a la escorrentía. Esto parece proporcionar indicios de que el modelo utilizado para el subproceso de Escorrentía, quizás no sea el más apropiado.

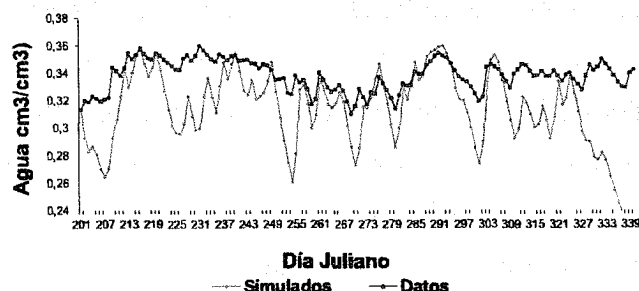
Tabla 4. 3. Balance hídrico de Mixteque. Valores Calibrados de los Parámetros de Escorrentía			
Parámetro/Ladera	Baja	Media	Alta
r_1	6,02E-03	1,43E-02	6,27E-03
r_{22}	0	5	0

Resultados del Modelo 1 (Modelo Base):

Balance hídrico de Mixteque Contenido de Agua en el Suelo:



Ladera Media. %ECM= 10.61; EFIC=- 8.99



Ladera Alta. %ECM= 13.34; EFIC=0.015

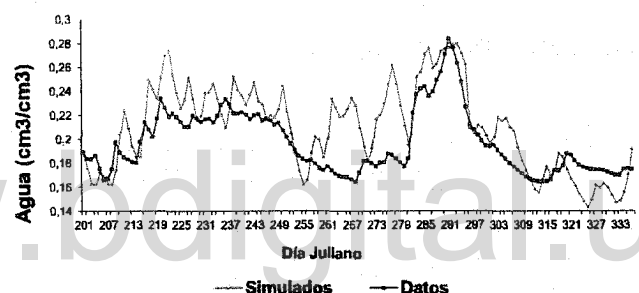


Figura 4. 3 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 1 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

La Figura 4.3 muestra el contenido de agua en el suelo para el experimento de Mixteque en cada una de sus laderas. En la ladera Baja se observa que el ajuste es bastante bueno desde que comienza el experimento hasta buena parte del desarrollo del cultivo que se corresponde al día número 53 después del inicio del experimento, y a partir de ahí comienza un pequeño desajuste entre los datos y los valores simulados, para luego volver tener un buen ajuste en la etapa final de la cosecha. En la ladera media se observa que los valores simulados en general, presentan una variabilidad mayor respecto a los datos durante todo el experimento. En esta ladera al final del experimento empieza a haber una

disminución en el contenido de agua en el suelo bastante significativa. Respecto a la ladera Alta se observa un buen ajuste al principio del experimento que corresponde a la etapa inicial de desarrollo del cultivo. En la etapa intermedia del experimento hay un mayor desajuste entre los valores simulados y los datos, y el mejor ajuste se obtuvo en esta ladera en la etapa final del experimento. Cabe destacar que en general el porcentaje del error cuadrático medio es inferior al 15%, lo cual indica que la simulación bajo esta métrica se puede considerar como buena, según Jamieson et al. (1991), por otro lado, si se toma el promedio del índice de eficiencia para todas las laderas se llega a la conclusión que el criterio de clasificación es Insuficiente.

En la tabla 4.4 se observa el cálculo del Error Cuadrático Medio de las Predicciones (MSEP) presentada en valores absolutos y en términos porcentuales, descompuestos en: Sesgo, Varianza y Aleatorio. Cabe destacar que, si se calcula el promedio porcentual de este índice, en sus diversos factores de descomposición, se observa que en este Modelo en promedio, el 51,42% del error se atribuye al componente aleatorio quedando un 36,27% a diferencia entre los valores promedios, y por último queda el componente de variabilidad con un 12,31%. Lo que refleja que este modelo en lo que se refiere al contenido de agua en el suelo, simula de forma aceptable la variabilidad, quedando más del 50% a factores no controlables en el experimento.

Adicionalmente la figura 4.4 muestra la recta de regresión de valores simulados/medidos del modelo 1, para el contenido de agua en el suelo sin tomar en cuenta las laderas, se observa como el coeficiente de determinación es de 0.80, lo que indica que el 80% de la variabilidad del contenido de agua en el suelo es explicada por el modelo, en dicho análisis se concluye que el intercepto es significativo al 5% de significancia por lo que este modelo sobreestima el contenido de agua en el suelo, la pendiente es significativa al 5% de significancia. De forma general se concluye que, este modelo puede predecir resultados dentro de un marco de situaciones esperadas en un agroecosistema tal como el de

Mixteque, independientemente de la diferencia que pueda existir entre los tratamientos.

Tabla 4. 4. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 1. Contenido de Agua en el Suelo. Descomposición del MSEP según Ladera					
Ladera/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza o Variabilidad	Aleatorio	
Baja	Abs	2,54E-04	8,54E-07	4,44E-04	6,99E-04
	%	36,29	0,12	63,59	100
Media	Abs	6,34E-04	3,08E-04	3,46E-04	1,29E-03
	%	49,21	23,92	26,88	100
Alta	Abs	1,61E-04	8,89E-05	4,40E-04	6,89E-04
	%	23,31	12,90	63,78	100
Promedio Porcentual		36,3	12,3	51,4	

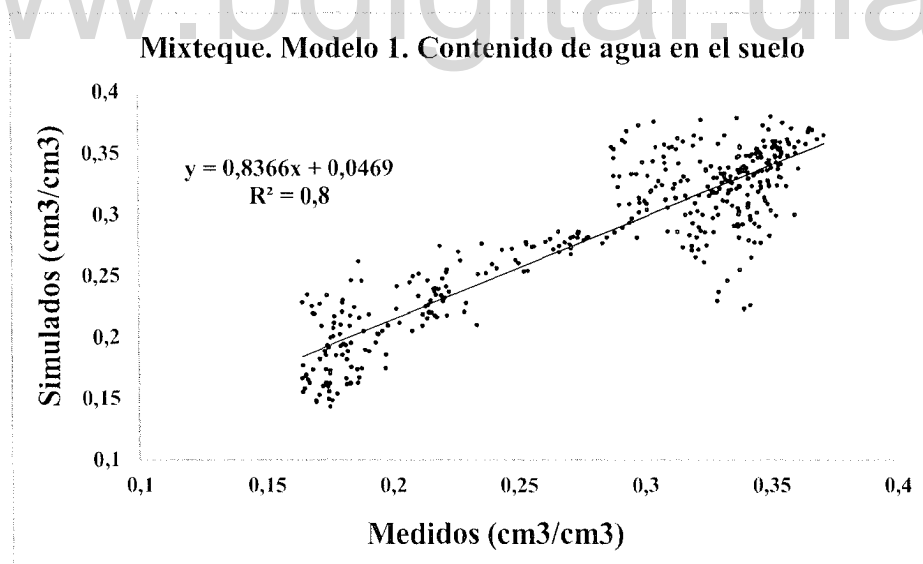
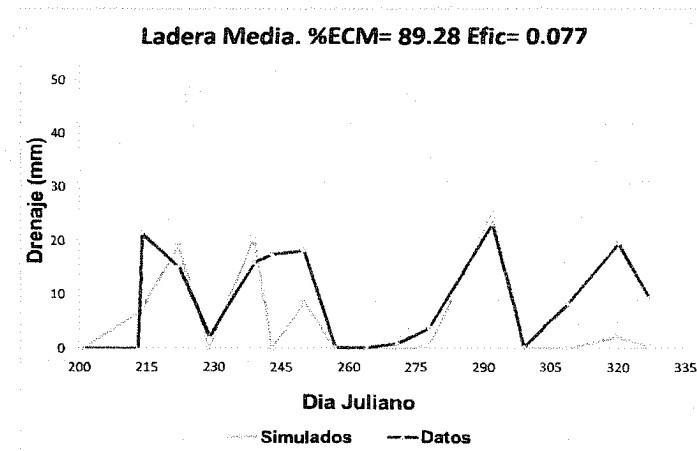
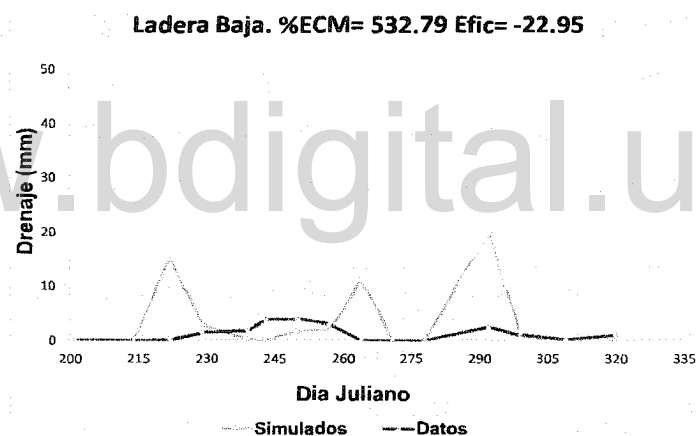


Figura 4. 4: Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del contenido de agua en el suelo para el Modelo 1

Balance hídrico de Mixteque Drenaje:

Respecto al Sub proceso de Drenaje mostrado en la Figura 4.5 se observa que en la Ladera Baja, en la mayor parte del experimento, el modelo simula más drenaje de lo que se corresponde con los datos, en la Ladera Media fue en donde mejor ajuste se obtuvo, y en la ladera Alta se puede observar que el ajuste fue bueno desde la mitad del experimento que corresponde cuando el cultivo se encuentra en plena fase de desarrollo, hasta el final del mismo que es cuando se termina la cosecha. Viendo este proceso desde el índice del porcentaje del error cuadrático medio se muestra que en todos los casos es mayor al 75% lo cual indica que el modelo no simula bien el subproceso de Drenaje. Y en lo que se refiere al Índice de Eficiencia se observa que es menor que uno en todos los casos lo que nos da otro indicio de que el Drenaje no se simula bien con esta ecuación.



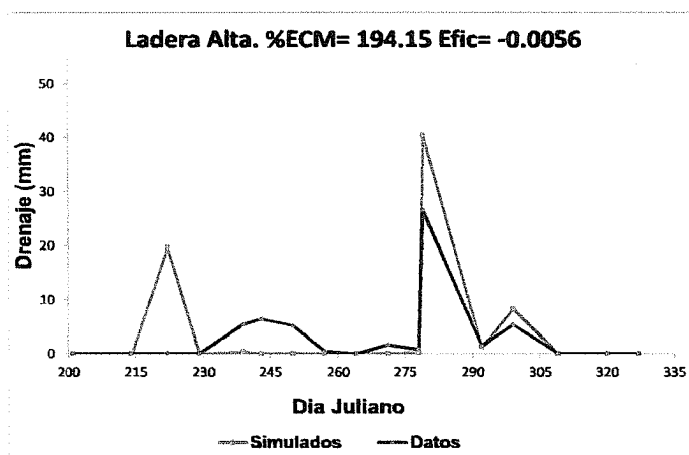


Figura 4. 5. Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 1 según laderas, indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

Respecto a la descomposición del Error Cuadrático Medio de las Predicciones, presentado en la tabla 4.5, se observa que en promedio el 54.3% del error se atribuye al componente aleatorio, quedando el resto debido a la diferencia entre los promedios y a la varianza o variabilidad. De forma general se puede concluir que a pesar que los índices de bondad de ajuste son deficientes, el mayor porcentaje del error de este subproceso de Drenaje se atribuye a factores aleatorios, simulando de forma aceptable los valores promedios o tendencia.

Tabla 4. 5. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 1. Drenaje. Descomposición del MSEP según Ladera					
Ladera/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza o Variabilidad	Aleatorio	
Baja	Abs	6,07E+00	2,45E+01	1,73E+01	4,79E+01
	%	12,68	51,26	36,05	100
Media	Abs	1,98E+01	1,27E-01	4,46E+01	6,45E+01
	%	30,69	0,20	69,11	100
Alta	Abs	1,08E+00	1,69E+01	2,44E+01	4,23E+01
	%	2,54	39,81	57,65	100
Promedio Porcentual		15,3	30,4	54,3	

En la regresión presentada para el proceso de drenaje mostrada en la Figura 4.6 se observa que el ajuste entre los valores simulados y los medidos en general no es la que se esperaba con la elaboración de este modelo, presentando un coeficiente de determinación de 0.35, es decir que este modelo puede simular el 35% de la variabilidad del proceso de drenaje, lo cual puede ser considerado un valor bajo. Además presenta un sesgo significativo al 5% de significancia, lo que se traduce que este modelo sobreestima el drenaje.

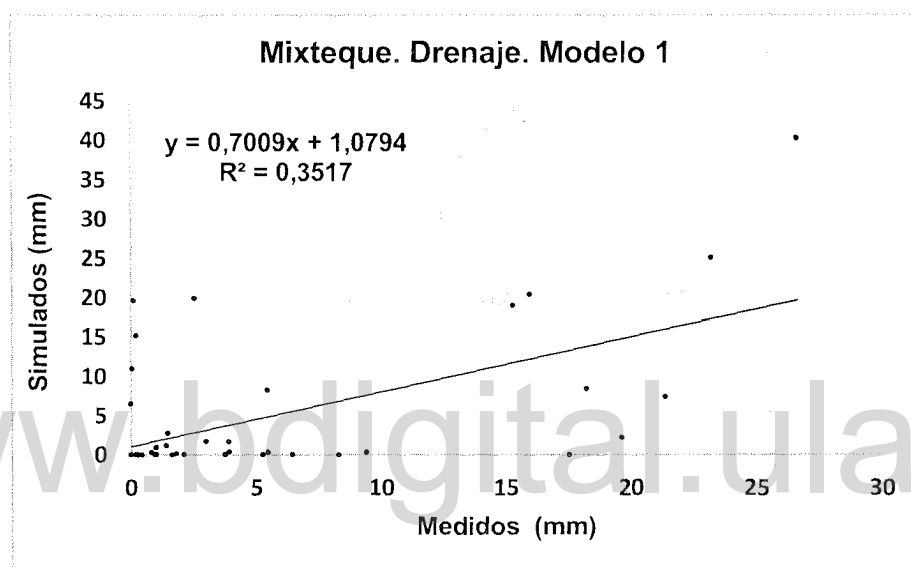


Figura 4. 6. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 1

Balance hídrico de Mixteque Escorrentía:

La Figura 4.7 muestra la distribución con respecto al sub proceso de Escorrentía, dicha figura muestra que la ladera Baja por lo general durante todo el experimento presenta un buen ajuste. En la ladera Media el mayor desajuste se presenta un poco antes de la mitad del experimento que es cuando el cultivo está terminando de desarrollarse, para luego presentar un buen ajuste al final del experimento. Finalmente en la ladera Alta que en general el ajuste fue bueno en todo el experimento. Visualmente se observa que el ajuste parece regular pero desde el punto de vista del Porcentaje del Error Cuadrático Medio los resultados no son

buenos ya que en todos los casos este índice es mayor al 90%, en lo que respecta al índice de eficiencia estos valores aunque son deficientes, la magnitud del error es menor, esta diferencia entre éstos índices se podría deber a la existencia de valores extremos que ejercen influencia en el cálculo del Porcentaje del Error Cuadrático Medio.

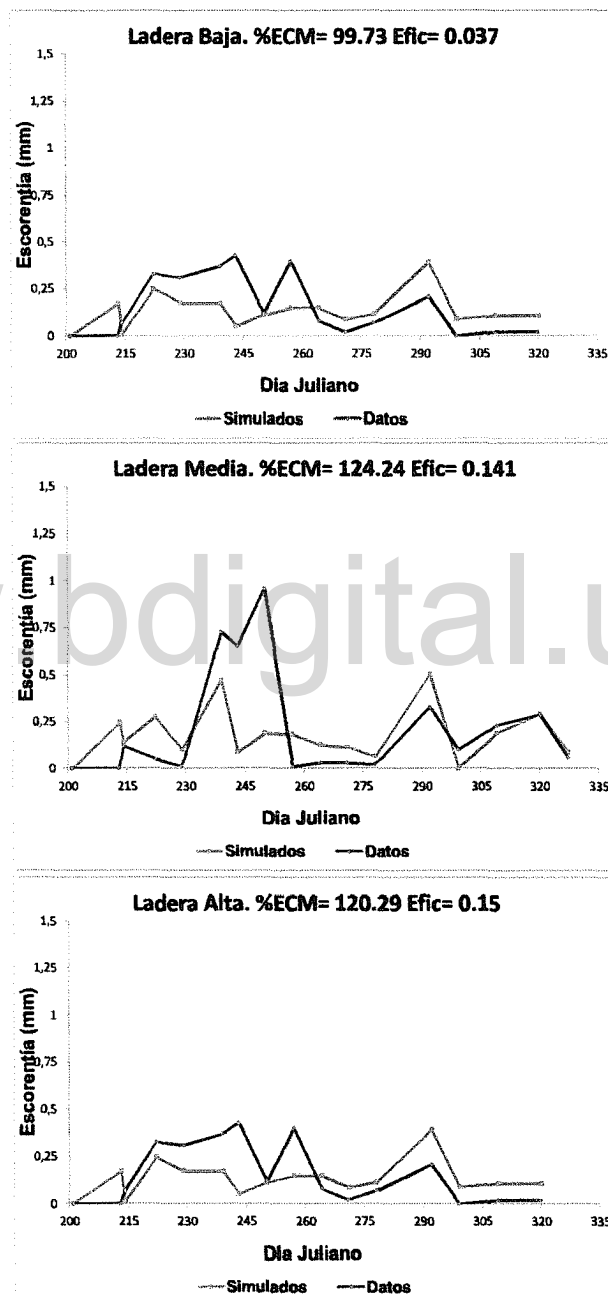


Figura 4. 7. Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación de la escorrentía utilizando el Modelo 1 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

En la tabla 4.6 se observa el cálculo del MSEP en valores absolutos y porcentuales, se muestra que la tendencia o el promedio de los datos se simula bastante bien pues, en todos los casos el porcentaje del error es inferior al 2%, por otro lado en promedio el porcentaje del error atribuido a la variabilidad es del 25%.

Tabla 4. 6. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 1. Escorrentía. Descomposición del MSEP según Ladera					
Ladera/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza o Variabilidad	Aleatorio	
Baja	Abs	5,00E-04	5,30E-03	1,93E-02	2,51E-02
	%	1,95	21,08	76,97	100
Media	Abs	1,30E-03	2,10E-02	5,77E-02	8,00E-02
	%	1,68	26,22	72,10	100
Alta	Abs	6,00E-04	1,19E-02	3,37E-02	4,62E-02
	%	1,28	25,77	72,95	100
Promedio Porcentual		1,6	24,4	74,0	

Por otro lado, vale la pena mencionar que la estructura en la cual se encuentra conformada todos los modelos, tienen la característica que el subproceso de Escorrentía es invariante ante cualquier cambio o modificación que se le haga a todos los modelos en el subproceso de evapotranspiración, esto se explica en el hecho que desde el enfoque de la dinámica de sistemas, el subproceso de escorrentía siempre ocurre antes del subproceso de evapotranspiración. En consecuencia, la modelización y los resultados de la Escorrentía será mostrada solo en este primer modelo tanto en el experimento de Mixteque como en el experimento de Gavidia, ya que los resultados de las simulaciones son las mismas en los modelos posteriores.

El análisis de regresión en el proceso de escorrentía, mostrado en la Figura 4.8 muestra que el ajuste entre los valores simulados y medidos no es bueno, ya que

presenta un coeficiente de determinación de 0.16, siendo este el proceso que presenta el valor más bajo. Por lo que este modelo 1 en el proceso de escorrentía no es capaz de poder predecir resultados dentro de un conjunto de condiciones que caractericen este tipo de agroecosistema como el de Mixteque.

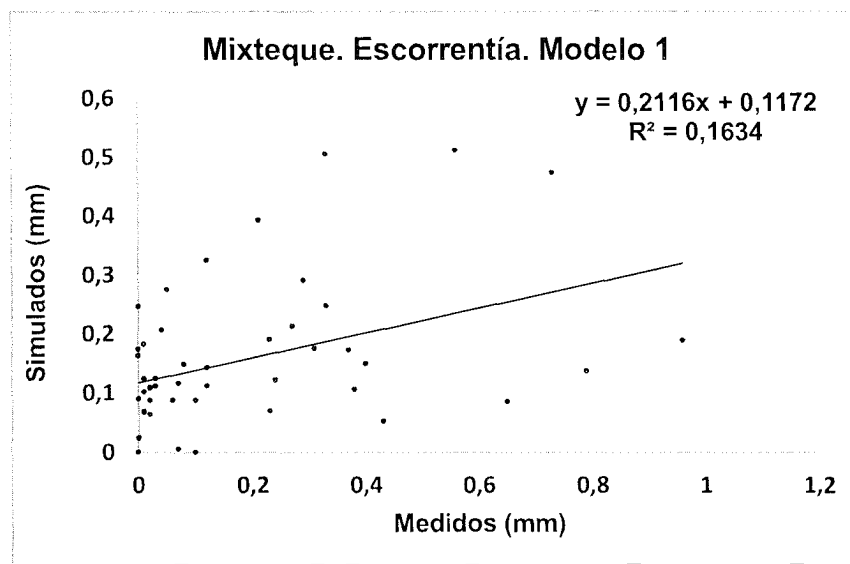


Figura 4. 8. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados de la escorrentía para el Modelo 1

Análisis de Sensibilidad Modelo Base Experimento de Mixteque:

En la Tabla 4.7, se puede observar la distribución del porcentaje del error cuadrático medio del contenido de agua en el suelo, ante cambios porcentuales del parámetro $r1$. Estos cambios consisten en incrementos que van desde el valor original producido por el proceso de calibración hasta llegar a un 40% del valor que es producto de la calibración. Es de destacar que la variación en el porcentaje del error cuadrático medio en ninguna de las laderas no sobrepasa un punto porcentual ante una variación máxima del 40% en el parámetro $r1$.

Adicionalmente se observa que, los valores que arrojó el modelo de calibración del Vensim, en los parámetros $r1$ y $r22$ mostrados en la tabla 4.1, todos son valores muy cercanos a cero, exceptuando el valor de la Ladera Media en el parámetro $r22$, en consecuencia tiene poco sentido práctico considerar

disminuciones porcentuales en los valores de dichos parámetros, ya que se alcanzaría valores totalmente fuera de rango.

Tabla 4. 7. Balance hídrico de Mixteque. Contenido de Agua en el Suelo cambios porcentuales del valor del Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del Parámetro r1, según Laderas						
Parámetro/Ladera	Baja		Media		Alta	
	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)
Calibrado	8,41	0	10,61	0	13,34	0
10%	8,402	0,0951	10,61	0,00	13,32	0,15
20%	8,397	0,1546	10,62	-0,09	13,3	0,30
30%	8,391	0,2259	10,62	-0,09	13,29	0,37
40%	8,385	0,2973	10,62	-0,09	13,27	0,52

En la Tabla 4.8, se observa la distribución del porcentaje del error cuadrático medio del contenido de agua en el suelo, ante cambios porcentuales del valor original calibrado del parámetro r22, análogamente vemos que el cambio porcentual del porcentaje del error cuadrático medio no excede en más de un punto porcentual ante cambios del 40% del valor original calibrado.

Nuevamente cabe mencionar de que a pesar de que los valores de los parámetros calibrados en el modelo, no son lo suficientemente acordes con la realidad, dichos valores tampoco van a afectar de manera significativa las variable y procesos que intervienen en el balance hídrico, ya que es el subproceso de evapotranspiración es que tiene mayor significancia, debido a lo complejidad del proceso como tal, y también al gran número de variables y factores que tienen que ser tomados en consideración.

Tabla 4. 8. Balance hídrico de Mixteque. Contenido de Agua en el Suelo. Cambios porcentuales en los valores del Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del Parámetro r22, según laderas						
Parámetro/Ladera	Baja		Media		Alta	
	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)
Calibrado	8,41	0,00	10,61	0	13,34	0
10%	8,41	0,00	10,6	0,09	13,34	0,00
20%	8,412	-0,02	10,6	0,09	13,34	0,00
30%	8,41	0,00	10,6	0,09	13,35	-0,07
40%	8,41	0,00	10,59	0,19	13,35	-0,07

Por otro lado, la tabla 4.9 muestra los cambios porcentuales en el porcentaje del error cuadrático medio ante cambios porcentuales en los valores de la pedregosidad, se puede observar que ante cambios porcentuales de la pedregosidad que van desde $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$, $\pm 40\%$, las laderas alta y media fueron las que mayor sufrieron cambios porcentuales significativos en el porcentaje del error cuadrático medio, sobre todo estos cambios se experimentan cuando hay la variación en el parámetro es en forma creciente. Se puede decir que en la medida que las laderas tienen mayor pedregosidad, también tienden a ser más sensibles en el contenido de agua en el suelo, ante incrementos porcentuales del valor de la pedregosidad.

Tabla 4. 9. Balance hídrico de Mixteque. Contenido de Agua en el Suelo. Cambios porcentuales en los valores del Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante cambios del valor de la proporción de la pedregosidad, según Laderas						
Parámetro/Ladera	Baja		Media		Alta	
	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)
Valor Medido	0,146	0	0,309	0	0,416	0
-10%	0,1314	-1,3	0,2781	-1,0	0,3744	-1,3
-20%	0,1168	-0,2	0,2472	-1,6	0,3328	-1,9
-30%	0,1022	-0,3	0,2163	-1,6	0,2912	-1,6
-40%	0,0876	-0,2	0,1854	-1,1	0,2496	-0,7
10%	0,1606	0,3	0,3399	1,8	0,4576	2,5
20%	0,1752	1,0	0,3708	4,3	0,4992	6,0
30%	0,1898	1,2	0,4017	7,6	0,5408	10,6
40%	0,2044	1,8	0,4326	11,9	0,5824	16,4

La Tabla 4.10 presenta como es el cambio porcentual del porcentaje del error cuadrático medio ante cambios porcentuales del valor del punto de marchitez permanente, se observa en este caso que existen cambios significativos del contenido de agua en el suelo ante cambios en el valor del punto de marchitez permanente, en consecuencia el valor del punto de humedad mínima del suelo en la cual el cultivo no puede seguir extrayendo agua, es un parámetro que tiene una relación significativa con el contenido de agua en el suelo, ya que se registran cambios en la humedad en el suelo ante cambios porcentuales del punto de marchitez permanente.

Tabla 4. 10. Balance hídrico de Mixteque. Contenido de Agua en el Suelo Distribución del Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del valor del punto de marchitez permanente (mm), según Laderas						
Parámetro/Ladera	Baja		Media		Alta	
	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)
Valor Medido	0,25	0	0,13	0	0,09	0
-10%	0,225	0,0	0,117	0,0	0,081	0,0
-20%	0,2	-7,7	0,104	4,5	0,072	-3,7
-30%	0,175	-7,7	0,091	8,0	0,063	-5,5
-40%	0,15	8,3	0,078	14,9	0,054	-4,6
10%	0,275	15,9	0,143	-2,8	0,099	2,5
20%	0,3	40,1	0,156	-6,6	0,108	7,2
30%	0,325	73,0	0,169	-10,7	0,117	13,0
40%	0,35	113,2	0,182	-14,9	0,126	19,6

El análisis de sensibilidad para el valor de la capacidad de campo se muestra en la tabla 4.11, en ella se observa que ante cambios porcentuales del valor del parámetro que oscilan entre más o menos 40% del valor medido, el cambio en el valor del porcentaje del error cuadrático medio oscila entre el -14,9% hasta el 19,6%, lo cual indica que este valor medido influye de forma significativa en el contenido de agua en el suelo.

Tabla 4. 11. Balance hídrico de Mixteque. Contenido de Agua en el Suelo Distribución del Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del valor de la capacidad de campo (mm), según Laderas

Parámetro/Ladera	Baja		Media		Alta	
	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)
Valor Medido	0,38	0	0,36	0	0,28	0
-10%	0,342	9,03	0,324	40,04	0,252	-8,72
-20%	0,304	49,54	0,288	58,92	0,224	26,25
-30%	0,266	66,38	0,252	69,01	0,196	49,71
-40%	0,228	73,93	0,216	75,13	0,168	62,59
10%	0,418	45,51	0,396	-29,44	0,308	9,83
20%	0,456	64,93	0,432	19,88	0,336	54,32
30%	0,494	74,12	0,468	49,22	0,364	65,71
40%	0,532	79,41	0,504	63,64	0,392	72,74

www.bdigital.ula.ve

4.2 Experimento de Gavidia:

La Figura 4.9 muestra el comportamiento de la distribución acumulada en el experimento de Gavidia durante los días del experimento, cabe destacar que la precipitación promedio diaria es de 3,40 mm, con una variabilidad de 7,50 mm, con una precipitación acumulada de 1406 mm, recordando que el periodo de este experimento va desde Enero 1992- hasta Febrero 1993, destacándose los meses de Abril 92 hasta Noviembre 92 como los meses donde mayor precipitación se registró, con valores que van desde 80 mm hasta 363 mm, siendo este periodo el de mayor eventos de caída de precipitación. Por otro lado, la precipitación promedio durante todo el periodo del experimento fue de 100 mm.

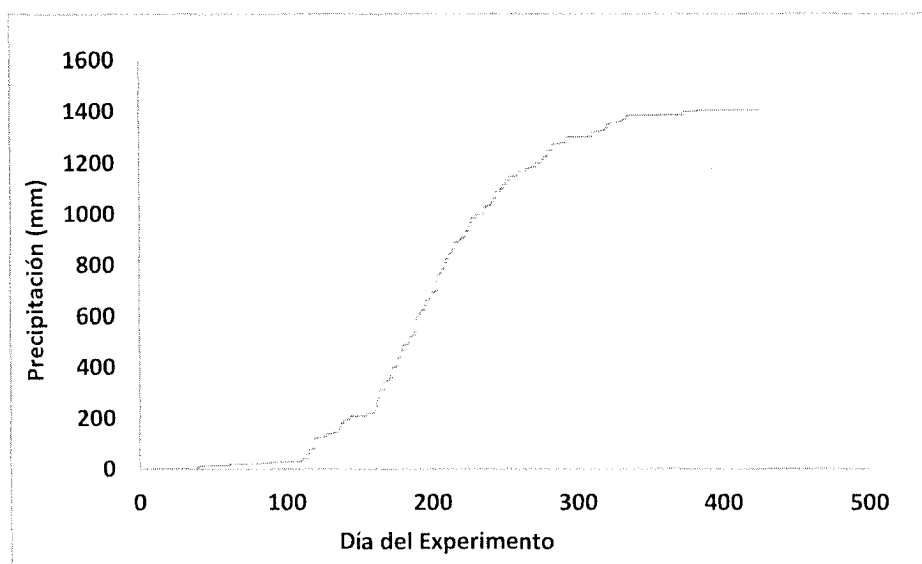


Figura 4. 9. Balance hídrico de Gavidia. Precipitación Acumulada durante los días del experimento.

La tabla 4.11 muestra los resultados de las características del suelo en el experimento de Gavidia, tales como pedregosidad punto de marchitez permanente (*pmp*) y capacidad de campo (*cc*). Cabe destacar que la capacidad de campo corregida por pedregosidad (*cc1*) es la capacidad de campo que no toma en cuenta el espacio o área del suelo que ocupa las piedras, determinándose por la siguiente expresión:

$$cc1: cc * (1 - pedregosidad)$$

De manera análoga el punto de marchitez permanente corregido por pedregosidad (*pmp1*) se determina de la siguiente manera:

$$pmp1: pmp * (1 - pedregosidad)$$

Tabla 4. 12. Balance hídrico de Gavidia. Valores de la proporción de la pedregosidad, capacidad de campo punto de marchitez permanente.

Proporción Pedregosidad	Capacidad de Campo (cm^3/cm^3)	Capacidad de Campo Corregida por pedregosidad cm^3/cm^3	Punto de Marchitez Permanente cm^3/cm^3	Punto de Marchitez Permanente corregido por pedregosidad cm^3/cm^3
0,311	0,533	0,367237	0,2725	0,1877525

Calibración del Modelo Base con ET_0 Experimento de Gavidia:

Antes de mostrar los resultados de las simulaciones en el experimento de Gavidia, se hace necesario realizar el proceso de calibración o parametrización en este experimento. Similar al experimento de Mixteque, los parámetros a calibrar en Gavidia son $r1$ y $r22$, descritos con detalle en la sección anterior. Al respecto es necesario aclarar lo siguiente, debido a que las parcelas con que se estructura éste experimento de Gavidia no tienen diferencias significativas en cuanto a la posición e inclinación, se considerará un valor individual por cada parámetro en este experimento.

El proceso de calibración nuevamente se hizo con el módulo de vensim en el siguiente espacio paramétrico. $0 \leq r1 \leq 1$ (al ser una proporción), y $0 \leq r22 \leq 15$. En la tabla 4.12 se muestra los valores de los parámetros, que son producto de la calibración.

Tabla 4. 13. Balance hídrico de Gavidia. Valores Calibrados de los Parámetros de Escorrentía

Parámetro	Valor Calibrado
$r1$	0,02683
$r22$	7,58

Resultados Modelo 1 Gavidia.

En la Figura 4.10, se observa la distribución del contenido de agua en el suelo correspondiente al experimento de Gavidia, el primero de ellos corresponde a los datos (a) y el segundo a los valores simulados (b) para el primer modelo elaborado. Se observa que después de cierto período de tiempo, este modelo difícilmente logra distinguir el contenido de agua en el suelo por parcelas. Por otro lado, vale la pena mencionar que este experimento de Gavidia posee también una gran parte de datos que corresponde al suelo desnudo después de una cosecha que corresponde a la parte final del experimento.

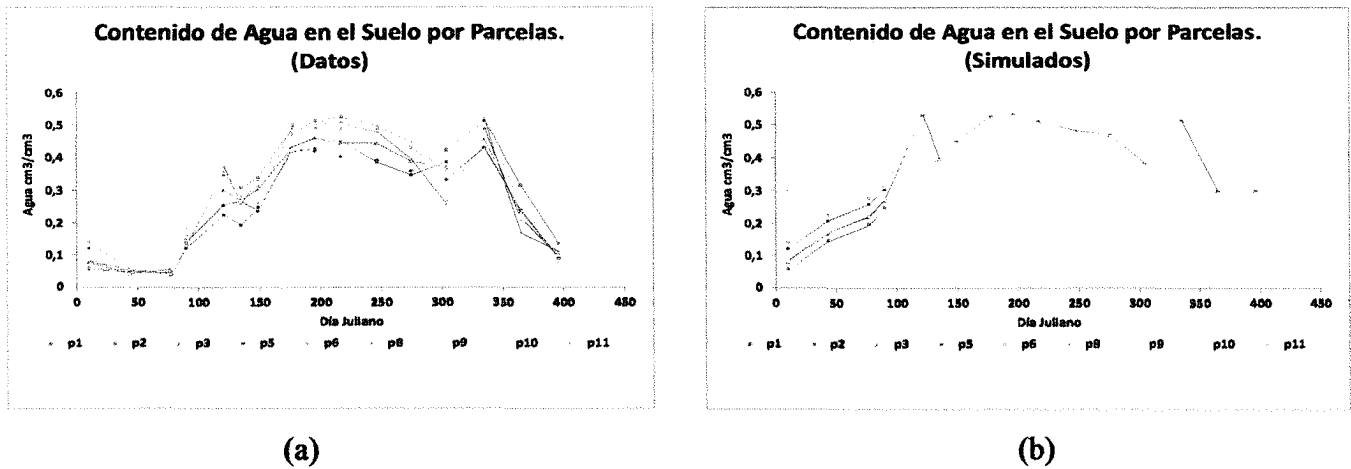


Figura 4. 10 Balance hídrico de Gavidia. Contenido de Agua en el Suelo Datos y Simulados del Modelo 1. (a) Datos. (b) Simulados

www.bdigital.ula.ve

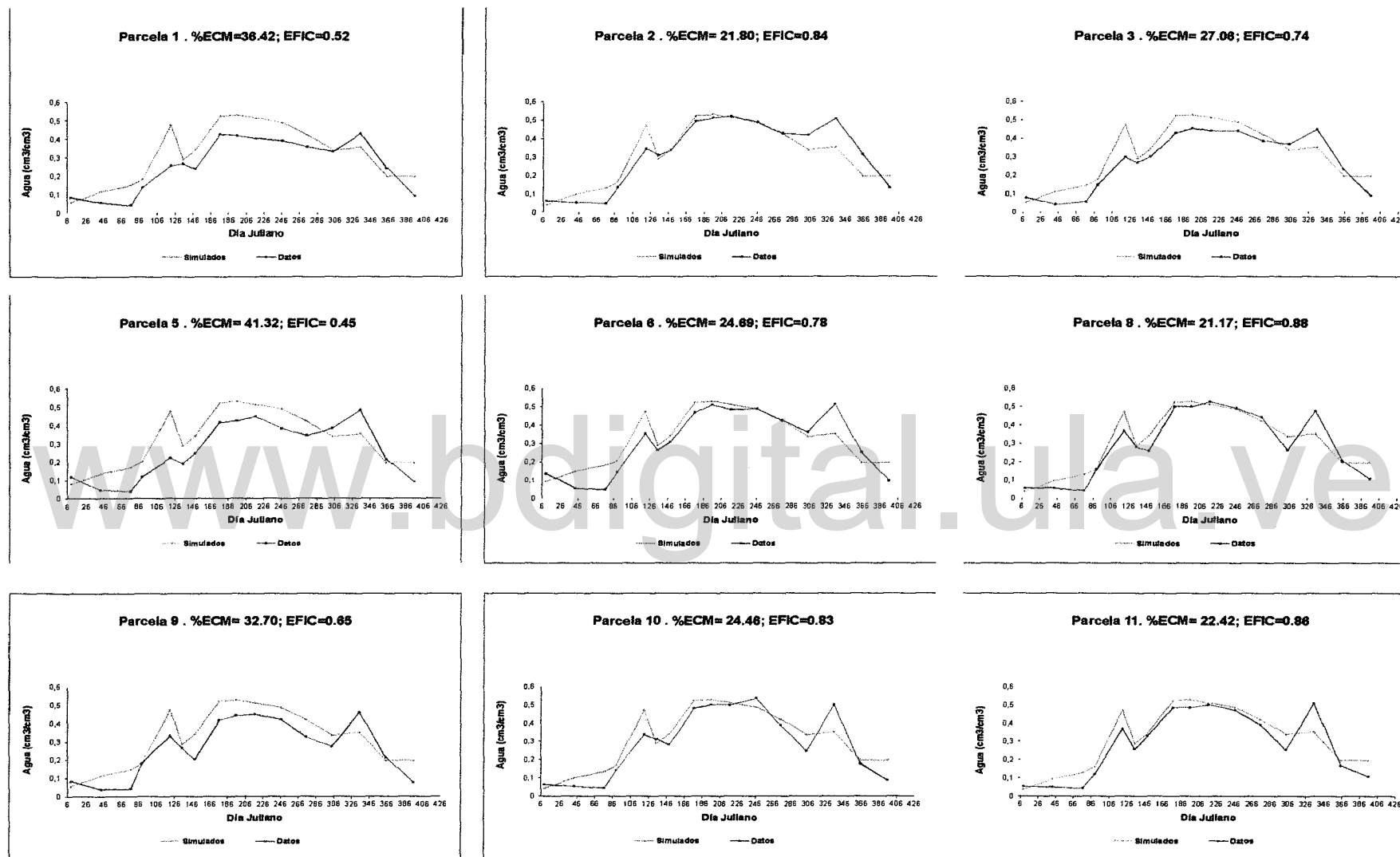


Figura 4. 11. Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 1 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

La Figura 4.11 corresponde a la distribución del contenido de agua en el suelo por parcelas, cabe destacar que en todas las parcelas este modelo 1, simula más cantidad de agua en el suelo que la que realmente presentan los datos, y por lo general el mejor ajuste se da después de la mitad del experimento, recordando nuevamente que en este caso esta parte corresponde en su mayoría a un suelo desnudo donde no existió ningún tipo de cultivo. Por otro lado se observa que a pesar de que el porcentaje del error cuadrático medio es alto en todas las parcelas, y el índice de eficiencia presenta valores que oscilan entre 0,45 y 0,84. Tomando en cuenta esta métrica, la simulación según Molnar (2011) se puede considerar como Bueno y Muy Bueno.

La tabla 4.13 presenta la distribución del (MSEP) del contenido de agua en el suelo según parcelas, se observa que el rango de este índice va desde $1,18\text{E}-03$ hasta $9,02\text{E}-03$, por otro lado se observa que en promedio porcentual el 73,66% del error se debe al componente aleatorio, y un 3,98% del error se atribuye a la varianza o variabilidad, quedando sólo 23,06% al sesgo o tendencia. Por lo que se puede concluir que este modelo en el experimento de Gavidia en lo que se refiere al contenido de agua en el suelo, simula bien la variación pero existe diferencias entre los valores promedios entre las dos series de datos.

Tabla 4. 14. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 1. Contenido de Agua en el suelo. Descomposición del MSEP según Parcelas					
Parcela/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza	Aleatorio	
P1	Abs	3,92E-03	3,06E-04	4,80E-03	9,02E-03
	%	43,45	3,39260	53,16	100
P2	Abs	1,09E-06	1,76E-04	4,71E-03	4,88E-03
	%	0,02	3,61	96,37	100
P3	Abs	1,67E-03	2,82E-05	4,12E-03	5,82E-03
	%	28,68	0,48	70,84	100
P5	Abs	4,47E-03	1,06E-08	7,33E-03	1,18E-02
	%	37,85	0,00	62,15	100
P6	Abs	5,24E-04	4,15E-04	4,88E-03	5,82E-03
	%	8,99	7,13	83,88	100
P8	Abs	4,21E-04	1,88E-04	3,01E-03	3,61E-03
	%	11,65	5,20	83,15	100
P9	Abs	3,24E-03	4,95E-05	4,33E-03	7,61E-03
	%	42,53	0,65	56,82	100
P10	Abs	7,33E-04	2,79E-04	4,13E-03	5,14E-03
	%	14,25	5,43	80,31	100
P11	Abs	8,47E-04	1,51E-04	3,21E-03	4,21E-03
	%	20,13	3,59	76,28	100
Promedio Porcentual		23,06	3,28	73,66	100

La figura 4.12 presenta la recta de regresión del contenido de agua en el suelo para el experimento de Gavidia, se observa que este modelo explica el 80% de la variabilidad producida de la humedad del suelo, tiene un intercepto significativo al 5%, por lo que sobreestima el contenido de agua en el suelo. Pero en general dicho modelo puede predecir de forma aceptable esta variable, cuando se tiene las condiciones que caracterizan a un experimento como éste, sin tomar en cuenta las diferencias que puedan existir entre los tratamientos.

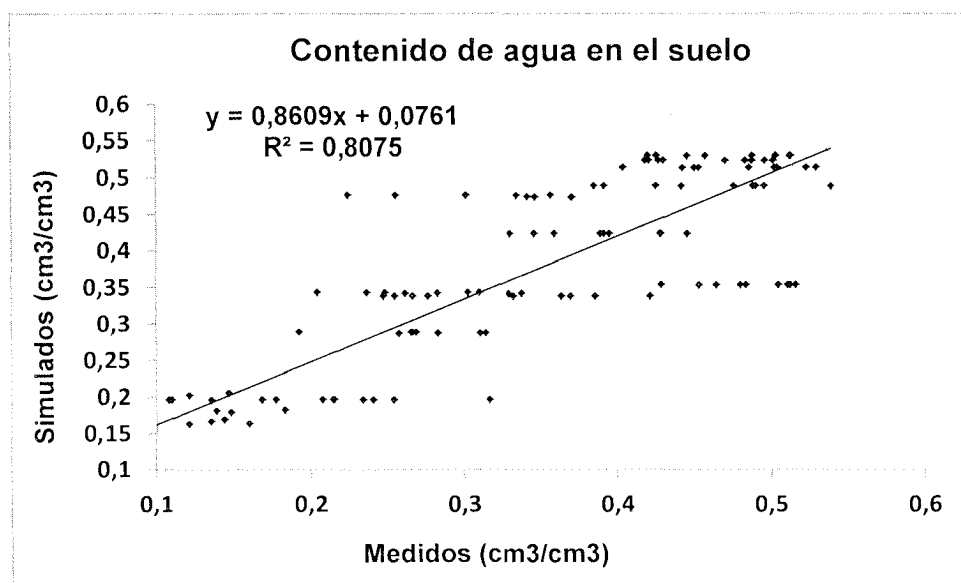


Figura 4. 12. Balance hídrico de Gavidia. Recta de regresión medidos/simulados del contenido de agua en el suelo para el Modelo 1

Gavidia Modelo Base Drenaje

En lo que se refiere al sub proceso de Drenaje reflejado en la figura 4.14, se observa que a pesar de tener un porcentaje del error cuadrático elevado (mayor al 29%), el índice de eficiencia oscila entre (-1,78 y 0,93). En la tabla 4.14 se observa la descomposición del MSEP por parcelas, en ella se observa que el rango del error va desde 1,22E+02 hasta 7,20E+03. Por otro lado, en términos porcentuales es de destacar que en general el 58,15% del error se debe al componente aleatorio, quedando un 33,86% debido a la variabilidad, y el resto 7,99% se debe a al sesgo.

Tabla 4. 15. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 1. Drenaje. Descomposición del MSEP según Parcelas					
Parcela/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza	Aleatorio	
P1	Abs	1,59E+02	9,37E+02	1,23E+02	1,22E+03
	%	13,03	76,89	10,08	100
P2	Abs	1,24E+02	2,88E+02	1,07E+03	1,48E+03
	%	8,37	19,43	72,20	100
P3	Abs	5,35E+01	1,98E+02	2,74E+02	5,25E+02
	%	10,19	37,65	52,16	100
P5	Abs	2,48E+02	6,58E+02	3,71E+03	4,62E+03
	%	5,37	14,24	80,39	100
P6	Abs	2,47E+00	8,09E+00	1,64E+02	1,75E+02
	%	1,41	4,63	93,96	100
P8	Abs	3,55E-01	1,64E+01	5,52E+01	7,20E+01
	%	0,49	22,85	76,66	100
P9	Abs	9,89E+01	4,54E+02	2,50E+01	5,77E+02
	%	17,13	78,55	4,33	100
P10	Abs	8,59E+00	1,34E+01	2,20E+02	2,42E+02
	%	3,55	5,52	90,93	100
P11	Abs	8,68E+01	3,15E+02	3,00E+02	7,02E+02
	%	12,37	44,95	42,68	100
Promedio Porcentual		7,99	33,86	58,15	100

En la Figura 4.13 se muestra la recta de regresión para el drenaje, es importante resaltar que este modelo explica 65% de la variabilidad del drenaje lo cual este modelo no hace muy confiable la simulación de esta variable ante situaciones esperadas, con las características de este agroecosistema de Gavidia.

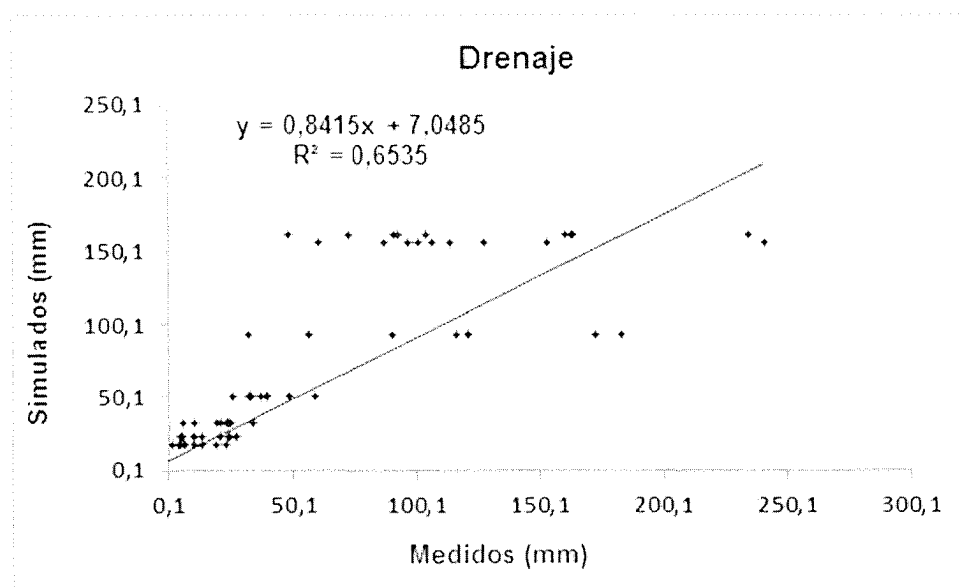


Figura 4. 13. Balance hídrico de Gavidia. Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 1

Balance hídrico de Gavidia Modelo Base Escorrentía:

En el sub proceso de Escorrentía presentado en la Figura 4.15, se observa que en la mayoría de las parcelas el índice de eficiencia arroja valores que oscilan entre -7,57 hasta 0,90. Por otro lado, a pesar de que el ajuste visual es aceptable, el porcentaje del error cuadrático medio es mayor al 29% en todos los casos.

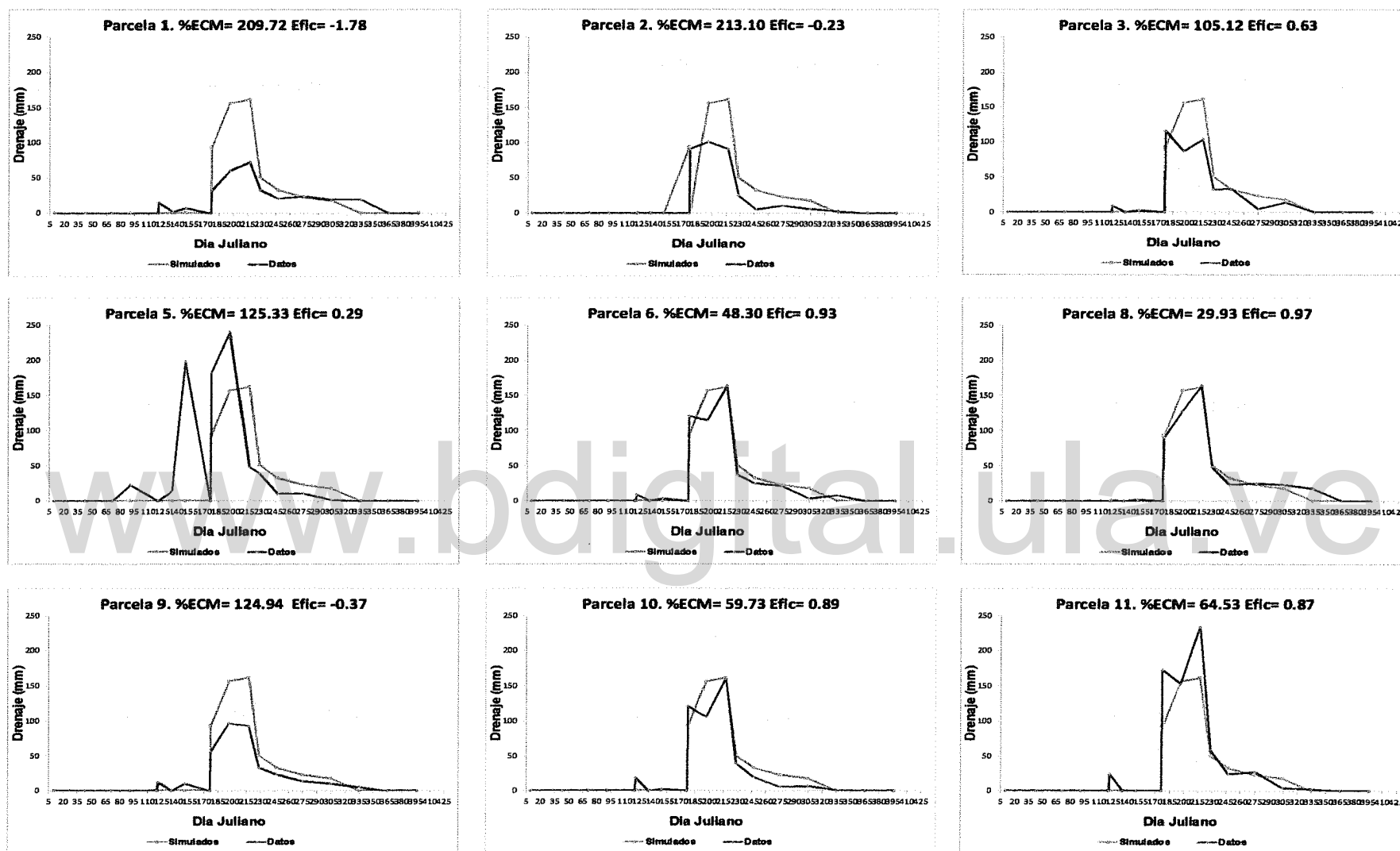


Figura 4. 14 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 1 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

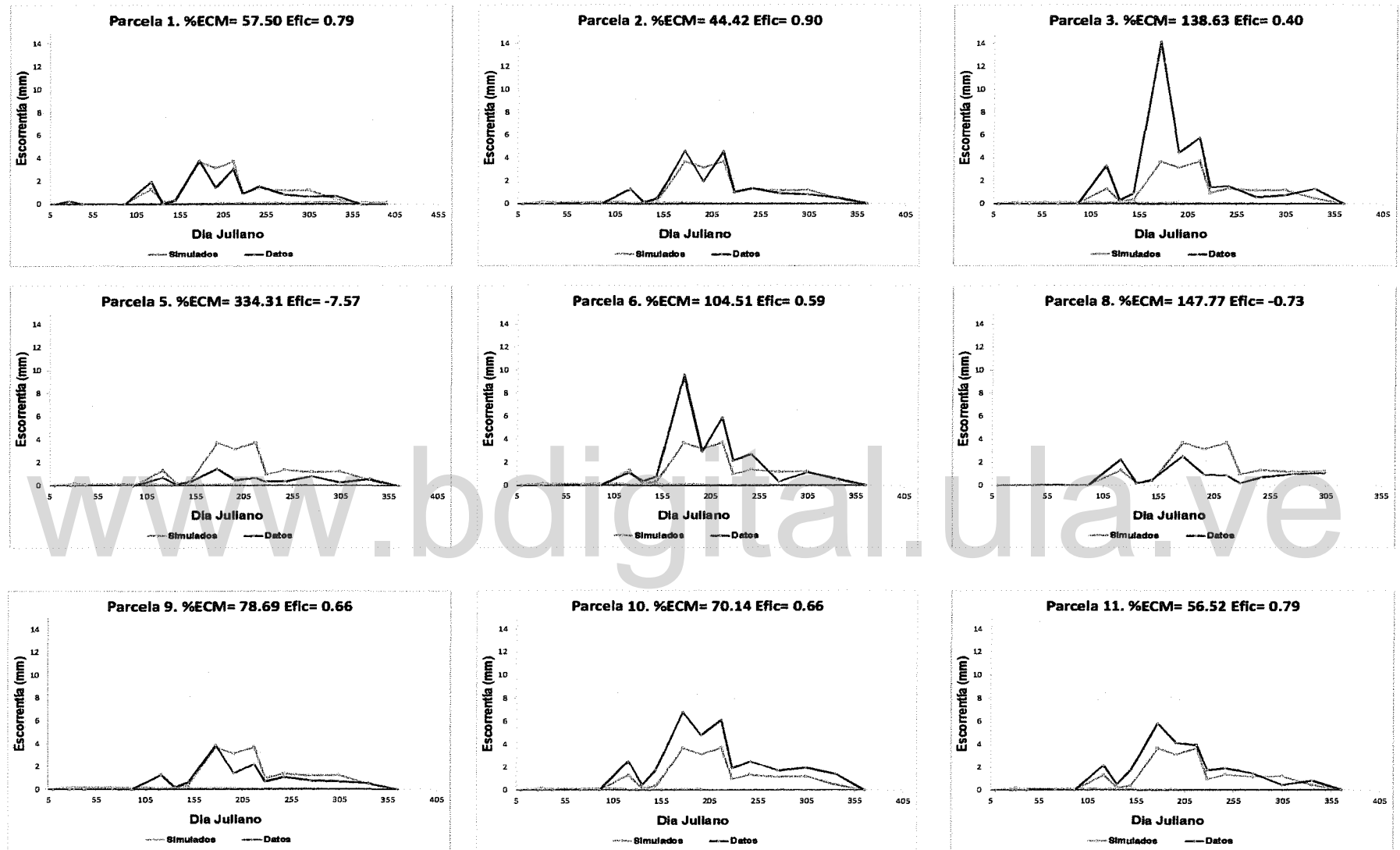


Figura 4. 15 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación de la escorrentía utilizando el Modelo 1 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

Observando la Tabla 4.15 que muestra la descomposición del error MSEP, se puede distinguir que el rango del error en términos absolutos varía de $1,91\text{E}-01$ hasta $6,82\text{E}+00$. Por otro lado, observando los valores promedios porcentuales se destaca que un 44.816% del error se le puede atribuir al componente aleatorio, luego, un 36,93% se debe a diferencias en la variabilidad de los datos y los valores simulados, quedando un 18.91% debido al sesgo o tendencia.

Tabla 4. 16. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 1. Escorrentía. Descomposición del MSEP según Parcelas					
Parcela/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza	Aleatorio	
P1	Abs	9,47E-03	2,00E-02	2,16E-01	2,45E-01
	%	3,86	8,15	87,99	100
P2	Abs	7,63E-04	2,64E-02	1,63E-01	1,91E-01
	%	0,40	13,88	85,72	100
P3	Abs	9,14E-01	4,64E+00	1,27E+00	6,82E+00
	%	13,39	68,06	18,56	100
P5	Abs	3,95E-01	7,14E-01	2,02E-01	1,31E+00
	%	30,09	54,47	15,44	100
P6	Abs	3,22E-01	1,50E+00	6,61E-01	2,48E+00
	%	12,98	60,39	26,63	100
P8	Abs	2,25E-01	2,79E-01	6,34E-01	1,14E+00
	%	19,77	24,48	55,75	100
P9	Abs	5,31E-02	6,60E-02	2,12E-01	3,31E-01
	%	16,05	19,93	64,02	100
P10	Abs	6,61E-01	7,44E-01	8,72E-02	1,49E+00
	%	44,31	49,85	5,84	100
P11	Abs	1,73E-01	1,95E-01	2,20E-01	5,88E-01
	%	29,34	33,21	37,46	100
Promedio Porcentual		18,91	36,93	44,16	100

En la figura 4.16 se observa la recta de regresión de la escorrentía para el Modelo 1 y es de destacar que este modelo presenta un coeficiente de determinación de 0,56, lo que indica que explica el 56% de la variabilidad producida por esta

variable, lo cual no lo hace un modelo muy confiable a la hora de hacer predicciones en lo que se refiere a la escorrentía.

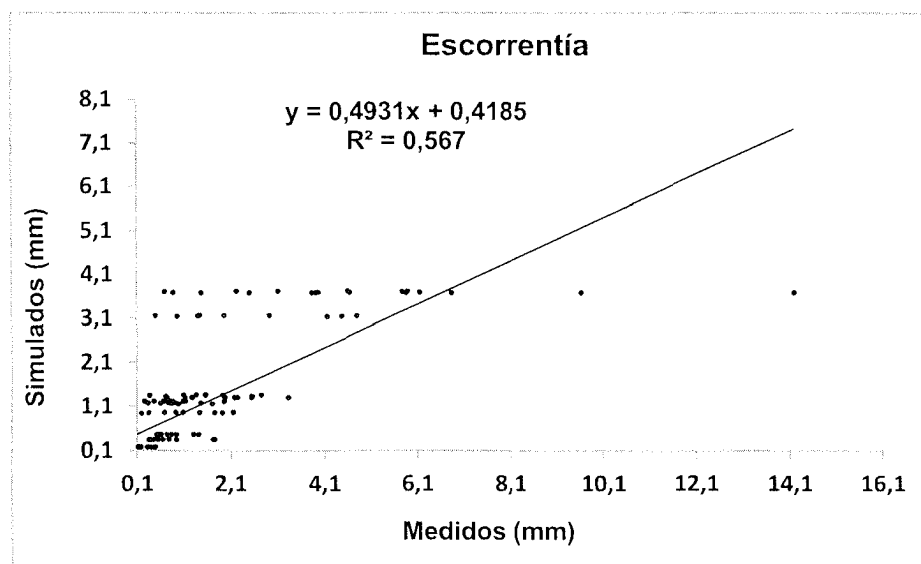


Figura 4. 16. Balance hídrico de Gavidia. Recta de regresión medidos/simulados de la escorrentía para el Modelo 1

Análisis de Sensibilidad Gavidia:

En lo que se refiere al análisis de sensibilidad, en las Tablas 4.16 y 4.17, se puede observar la distribución del porcentaje del error cuadrático medio del contenido de agua en el suelo, ante cambios porcentuales del parámetro $r1$ y $r22$ respectivamente, en el caso del parámetro $r1$, sólo se consideró aumento, ya que en el caso de que se hubiese considerado disminuciones, se llegaría a valores que se encuentran fuera de lo que realmente pudiera alcanzar. Ahora en el caso del parámetro $r22$ se consideraron aumentos y disminuciones hasta llegar a un 40% del valor originalmente calibrado. Es de destacar que en cualquiera de los casos, la variación en el porcentaje del error cuadrático medio en ningún caso sobrepasa un punto porcentual.

Tabla 4. 17. Balance hídrico de Gavidia. Contenido de agua en el suelo cambios porcentuales del porcentaje del error cuadrático medio ante cambios del parámetro r1, según parcelas.

Parámetro /Ladera	p1		p2		p3		p5		p6		p8		p9		p10		p11	
	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)
Calibrado	53,6	0	28,1	0	42,1	0	59	0	38	0	35,1	0	50,3	0	38,8	0	37,1	0
10%	53,6	0,00	28,1	0	42,1	0	59	0	38	0	35,1	0	50,3	0	38,8	0	37,1	0
20%	53,6	0,00	28,1	0	42,1	0	59	0	38	0	35,1	0,03	50,3	0	38,8	0	37,1	0
30%	53,6	0,02	28,1	0	42,1	0,02	59	0	38	0	35,1	0,03	50,3	0	38,8	0	37,1	0
40%	53,6	0,02	28,1	0,04	42,1	0,02	59	0,02	38	0,03	35,1	0,03	50,3	0,02	38,8	0	37,1	0

Tabla 4. 18. Gavidia. Contenido de agua en el suelo. Cambios porcentuales del porcentaje del error cuadrático medio antes cambios del parámetro r22, según parcelas

Parámetro /Ladera	p1		p2		p3		p5		p6		p8		p9		p10		p11	
	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)	Abs	Dif (%)
Calibrado	53,6	0,00	28,1	0,00	42,1	0,00	59	0,00	38	0,00	35,1	0,00	50,3	0,00	38,8	0,00	37,1	0,00
10%	53,6	0,00	28,1	0,00	42,1	0,00	59	0,00	38	0,00	35,1	0,00	50,3	0,00	38,8	0,00	37,1	0,00
20%	53,6	0,00	28,1	0,00	42,1	0,00	59	-0,02	38	0,00	35,1	0,00	50,3	-0,02	38,8	-0,03	37,1	-0,03
30%	53,6	0,00	28,1	0,00	42,1	0,00	59	-0,02	38	0,00	35,1	0,00	50,3	-0,02	38,8	-0,03	37,1	-0,03
40%	53,6	0,00	28,1	0,00	42,1	0,00	59	-0,02	38	0,00	35,1	0,00	50,3	-0,02	38,8	-0,03	37,1	-0,03
-10%	53,6	0,02	28,1	0,04	42,1	0,02	59	0,00	38	0,00	35,1	0,03	50,3	0,00	38,8	0,00	37,1	0,00
-20%	53,6	0,04	28,1	0,07	42,1	0,05	59	0,03	38	0,05	35,1	0,06	50,3	0,04	38,8	0,03	37,1	0,03
-30%	53,5	0,06	28,1	0,11	42,1	0,07	59	0,05	38	0,08	35,1	0,09	50,3	0,06	38,8	0,08	37,1	0,08
-40%	53,5	0,11	28,1	0,21	42,1	0,14	59	0,08	38	0,13	35	0,14	50,2	0,10	38,8	0,13	37,1	0,13

La tabla 4.18 presenta como es el cambio porcentual en el error cuadrático medio tomando en cuenta el contenido de agua en el suelo, cuando se hacen cambios absolutos en el valor medido de la pedregosidad, dicho valor en el experimento de Gavidia fue de 0.273, (valor único para todas las parcelas). Estos cambios se han hecho con aumentos y disminuciones de forma progresiva hasta llegar al 40% del valor medido, se puede observar que la variación porcentual del error cuadrático medio tiene un rango que va desde -10.99 hasta 16.14, por lo que se puede concluir que este valor genera variaciones significativas en el contenido de agua en el suelo del modelo planteado.

Tabla 4. 19. Balance hídrico de Gavidia. Contenido de Agua en el Suelo, cambios porcentuales en el Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del valor del punto de marchitez permanente (mm), según Parcelas										
Parámetro/Ladera	Abs	p1	p2	p3	p5	p6	p8	p9	p10	p11
Medido	0,273	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)
-10%	0,241	-1,730	1,744	-1,996	-2,707	-4,133	-2,033	-2,080	-2,371	-2,096
-20%	0,210	-3,543	3,534	-3,734	-5,656	-7,496	-3,570	-3,853	-4,334	-3,925
-30%	0,179	-6,015	4,727	-6,396	-8,557	-10,130	-5,007	-6,024	-6,909	-6,200
-40%	0,148	-8,130	6,012	-8,318	-10,998	-11,467	-6,495	-7,768	9	-8,876
10%	0,304	1,566	-1,469	1,922	2,103	2,229	2,628	2,141	2,617	2,765
20%	0,335	3,378	-2,249	4,325	4,013	4,457	6,346	4,618	5,969	6,378
30%	0,366	5,685	-2,432	7,468	6,019	6,726	10,907	7,706	10,016	10,794
40%	0,397	8,322	-1,744	11,091	8,509	9,765	16,609	11,223	14,718	16,146

Similar a la tabla anterior, la tabla 4.19 muestra el cambio porcentual en el porcentaje del error cuadrático medio en el contenido de agua en el suelo, ante cambios absolutos en el valor medido del punto de marchitez permanente. Dicho valor para el experimento de Gavidia fue de (0.311) para todas las parcelas del experimento. En este caso la variación porcentual en el porcentaje del error cuadrático medio va desde -9,363 hasta 9.64.

Tabla 4. 20. Balance hídrico de Gavidia. Contenido de Agua en el Suelo, cambios porcentuales en el Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del valor de la proporción de la pedregosidad, según Parcelas										
Parámetro/Ladera	Abs	p1	p2	p3	p5	p6	p8	p9	p10	p11
Medido	0,311	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)
-10%	0,280	-0,742	-0,742	-0,742	-0,742	-0,742	-0,742	-0,742	-0,742	-0,742
-20%	0,249	-1,538	-5,002	-2,847	-1,765	-3,849	-1,140	0,092	-0,736	-0,178
-30%	0,218	-2,252	-7,251	-4,104	-2,514	-5,592	-1,487	0,122	-0,899	-0,045
-40%	0,187	-3,021	-9,362	-5,323	-3,360	-7,131	-1,785	0,122	-1,063	0,045
10%	0,342	0,796	2,937	1,590	0,870	1,297	1,041	0,061	0,736	0,491
20%	0,373	1,868	6,104	3,512	1,716	2,674	2,578	0,367	1,676	1,383
30%	0,404	3,186	9,637	5,841	2,272	4,295	4,611	1,009	3,025	2,587
40%	0,436	4,669	13,722	8,503	3,022	6,199	7,437	1,957	4,988	4,460

La tabla 4.21 muestra el análisis de sensibilidad del valor de la capacidad de campo ante cambios porcentuales del valor medido, estos cambios varían entre $\pm 40\%$, en la misma se puede observar que el porcentaje del error cuadrático medio tiene una variación del oscila entre -7.25% hasta el 13.72% lo que nos puede arrojar una evidencia de lo significativo que es este parámetro del modelo sobre el contenido de agua en el suelo.

Tabla 4. 21. Balance hídrico de Gavidia. Contenido de Agua en el Suelo, cambios porcentuales en el Porcentaje del Error Cuadrático Medio ante Cambios del valor de la capacidad de campo (mm) según Parcelas

Parámetro/Ladera	Abs	p1	p2	p3	p5	p6	p8	p9	p10	p11
Medido	0,533	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)	Dif (%)
-10%	0,4797	-21,24	11,09	-13,57	-13,67	1,63	2,20	-19,87	-1,26	-4,08
-20%	0,4264	-31,55	28,35	-8,25	-19,01	14,89	20,65	-23,50	12,64	11,46
10%	0,5863	20,05	10,53	20,38	15,90	13,31	18,11	20,61	15,86	19,43
20%	0,6396	35,04	29,55	36,84	29,46	29,73	36,69	36,09	32,60	37,09
30%	0,6929	45,61	44,53	48,34	39,91	42,88	49,74	46,93	45,16	49,45
40%	0,7462	53,23	54,91	56,42	47,76	52,36	58,65	54,66	54,14	58,01

4.2 Modelo 2: Modelo Base con ET_c :

4.2.1 Resultados Balance hídrico de Mixteque

Debido a las características particulares que presentan los dos experimentos estudiados en este trabajo sobre los cultivos de papa, se realizó un ajuste en los criterios de las longitudes de las etapas del desarrollo del cultivo, esto debido a que los experimentos no cumplían con los requerimientos de las etapas que se plantean en Allen et al. (1998).

Tabla 4. 22. Balance hídrico de Mixteque. Cobertura del Suelo Máxima, e Índice de Área Foliar Máximo por Ladera

Ladera	% Cobertura	Índice de Área Foliar (Adm)
Baja	75%	2,31
Media	80%	2,65
Alta	64%	1,71

Recordando que la longitud de la etapa de desarrollo comprende desde que el cultivo alcanza el 10% de cobertura hasta que el mismo alcanza su cobertura completa o efectiva o el índice de área foliar llega a un valor de 3, en la Tabla 4.20 se puede observar que en ningún momento se logra alcanzar un valor de área foliar de 3. Además según . (Allen, et al. 1998) en algunos cultivos especialmente para aquellos más grandes de 0.5 mts, el promedio de la fracción del suelo cubierta por la vegetación se encuentra entre 0.7 y 0.8. En consecuencia las etapas quedarán definidas de la siguiente manera:

Inicial: Desde la plantación del cultivo hasta que llega al 0.10 de Cobertura.

Desarrollo: Desde el 0.10 hasta el 0.70 de cobertura del cultivo.

Medio: Comienza el día en que la cobertura del cultivo alcance 0.70, ahora bien, para definir el final de este período, hay que recordar que la cobertura sigue en aumento hasta lograr su máximo valor, cuando llega a su máximo valor la cobertura comienza un proceso de disminución progresiva. El período Medio termina cuando la cobertura llega nuevamente al 0.70, cuando ésta se encuentra en disminución.

Final: Va desde el momento en que la cobertura va en descenso a partir del 0.70 hasta que se realiza la cosecha, fin del ciclo del cultivo.

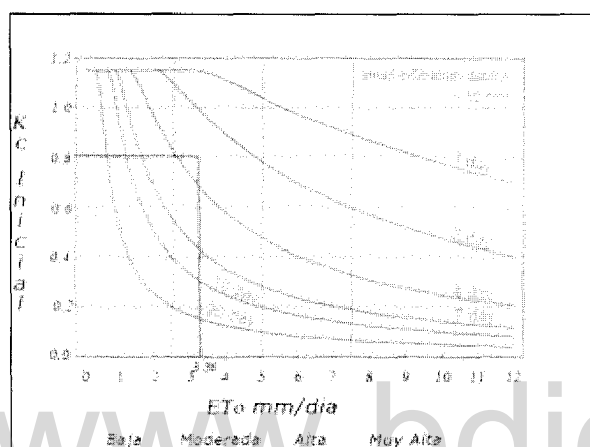
Final 2: Se encuentra desde el fin de la cosecha hasta que termina el experimento, período en que el suelo se encuentra desnudo.

En la Tabla 4.21 se muestra la longitud de las etapas definidas anteriormente. Nótese que en la ladera alta con esta estructuración, como nunca llega la cobertura al 0.7, entonces la etapa media en la ladera alta durará un solo día, que es el día la cual alcanza la cobertura máxima e inmediatamente le dará paso a la etapa siguiente.

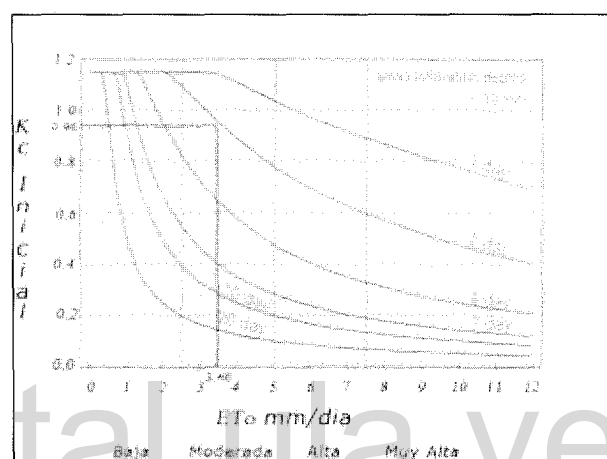
Tabla 4. 23. Balance hídrico de Mixteque. Duración de las Etapas (días) según Laderas					
Laderas / Etapas	Inicial	Desarrollo	Medio	Final	Final 2
Baja	0-39	40-73	74-83	84-112	112-113
Media	0-43	44-71	72-92	93-128	129-143
Alta	0-44	45-93	93-93	94-143	143-145

En consecuencia, el coeficiente inicial del cultivo, se estimará mediante la Figura 4.17, la cual toma en cuenta los tres factores citados por (Allen et al. 1998), y el cual arrojará una estimación más certera de este coeficiente en su etapa inicial, para ello se estimará la evapotranspiración promedio durante la etapa inicial, y el número promedio de días que ocurren entre eventos de lluvia o riego. En este experimento de Mixteque se tomó en cuenta todos los eventos de lluvia independientemente de la cantidad caída, ya que con estos se obtuvo el mejor ajuste. En la Tabla 4.22 se muestra los valores promedios de la evapotranspiración de manera conjunta con el promedio para tres casos (todos los eventos, eventos con cantidad mayor a 1 mm, y eventos mayor a 2mm).

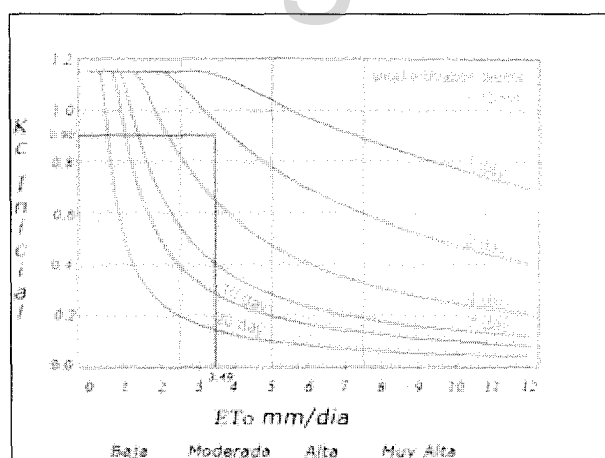
Tabla 4. 24. Balance hídrico de Mixteque Evapotranspiración y Promedio de Días entre eventos de Lluvia y/o Riego por Laderas				
Ladera	ETPO (mm)	Eventos (Total)	Eventos >1 mm	Eventos >2 mm
Baja	3,36	3,07	4,44	4,47
Media	3,46	2,18	3,28	3,83
Alta	3,49	2,25	3	3



(a)



(b).



(c)

Figura 4. 17 Estimación del coeficiente Inicial del cultivo por Ladera.
(a) Baja, (b) Media, (c) Alta

Fuente: (Allen , et. al 1998,p.117).

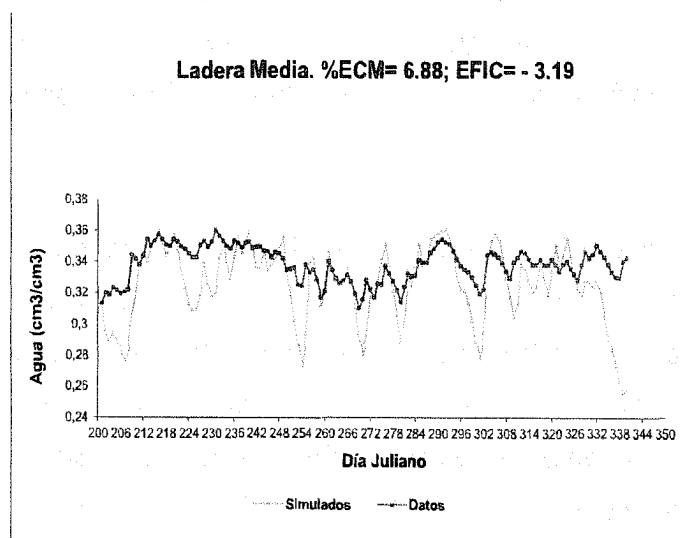
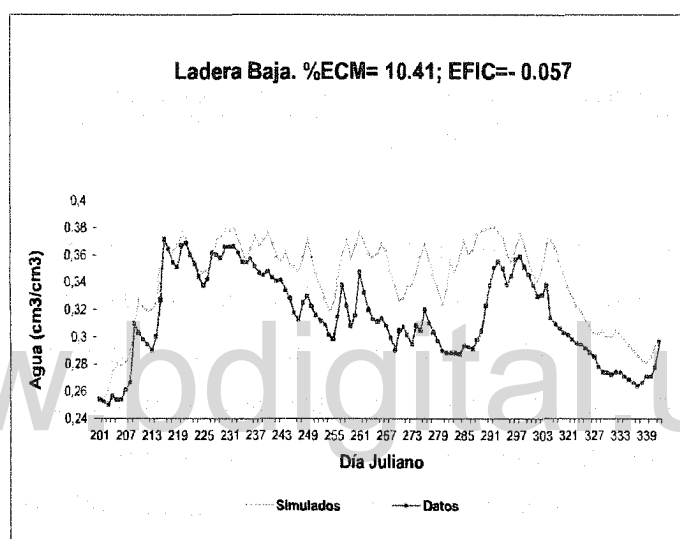
En las Figura 4.17 (a)- (c) se observan las estimaciones del coeficiente inicial en el experimento de Mixteque, tomando en cuenta el poder evaporativo de la atmósfera, y la magnitud de los eventos de lluvia, en base a la evapotranspiración promedio en cada ladera durante esta etapa inicial. En ellas se traza una perpendicular al eje (Y) en base a la evapotranspiración promedio y las curvas representan el promedio de días que ocurren entre cada evento de lluvia, estos coeficientes son calculados para cada ladera con los datos proporcionados en la Tabla 4.22.

Cálculo del Coeficiente medio de cultivo (k_{cMed})

Para la determinación del coeficiente del cultivo en la etapa media (K_{cmed}) es de destacar que Allen, et al. (1998, p.110), presenta unos valores tabulados de acuerdo al tipo del cultivo. Estos valores tabulados, son coeficientes que corresponden a cultivos que tienen una cobertura completa o tienen un índice de área foliar igual o mayor a 3. En consecuencia, como en este experimento ninguna de las condiciones se cumple, se hace necesario realizar un ajuste mediante una regla de tres, en función al índice de área foliar. Ahora bien, al realizar dicho ajuste para el cálculo del coeficiente del cultivo en su etapa media (K_{cmed}), los mismos resultan ser menores que los coeficientes del cultivo en su etapa inicial (K_{cni}), lo cual ocasionaría un desajuste significativo en la distribución del contenido de agua en el suelo, ya que la evapotranspiración se vería disminuida significativamente de forma errada. Debido a esto, para el cálculo del coeficiente del cultivo en su etapa media se utilizará directamente los coeficientes tabulados presentados en : (Allen et al. 1998), al igual que los coeficientes de la etapa final (K_{cend}). En el caso de los coeficientes del cultivo en la etapa final², se procedió a calcularlos de forma similar como se calcularon los coeficientes en la etapa inicial. En la Tabla 4.23 se muestran los coeficientes de acuerdo a la etapa donde se encuentre el cultivo según cada ladera:

Tabla 4. 25. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 2. Valores del Coeficiente del cultivo (Dmnl) según Laderas, por Etapas				
Laderas/Etapas	Inicial	Media	Final	Final 2
Baja	0,8	1,15	0,75	0,87
Media	0,96	1,15	0,75	1,03
Alta	0,90	1.15	0,75	0,95

Resultados Modelo 2 Balance hídrico de Mixteque Contenido de Agua en el Suelo



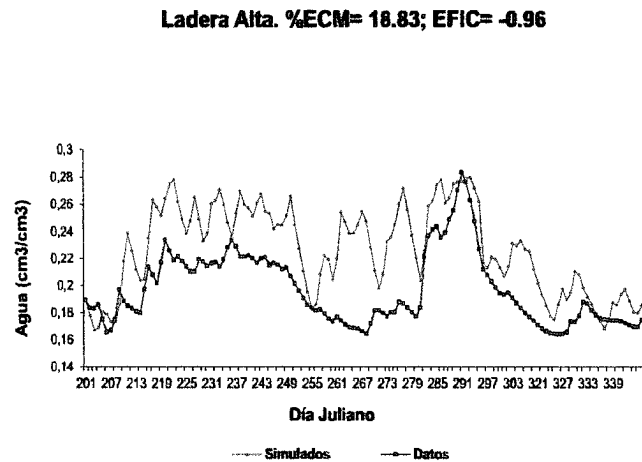


Figura 4. 18. Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 2 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia.

Al observar la distribución del contenido de agua en el suelo Figura 4.18, se observa que el ajuste del modelo en la ladera baja es aceptable en la etapa inicial del experimento que corresponde al desarrollo del cultivo, obteniendo un mayor desajuste después que el cultivo empieza a desarrollarse por completo. El índice de eficiencia al estar cercano a cero nos indica que los valores promedios entre los datos y los valores simulados son similares. En lo que se refiere a la ladera Media se puede ver que los datos simulados presentan una mayor variabilidad comparada con la de los datos, observando el Porcentaje del error cuadrático medio vale la pena mencionar que el máximo error es de 18,83%, en consecuencia, la simulación puede ser considerada como Buena, según (Molnar, 2011).

En lo que se refiere al MSEP reflejado en la Tabla 4.24 se observa que en términos porcentuales en este experimento el 10,9% del error se debe a la variabilidad de los datos, teniendo un 55% del error debido a la diferencia entre los promedios de los datos con los valores simulados, y finalmente un 34% debido al componente aleatorio nuevamente se puede observar que el mejor componente que se simula en este modelo es el de la variabilidad de los datos, existiendo

problemas en la simulación del valor promedio del contenido de agua en el suelo. La recta de regresión mostrada en la figura 4.19 se observa que el modelo explica el 82% de la variabilidad del contenido de agua en el suelo, con un intercepto significativo pero muy cercano a cero.

Tabla 4. 26. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 2. Contenido de Agua en el Suelo. Descomposición del MSEP según Ladera

Ladera/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza o Variabilidad	Aleatorio	
Baja	Abs	7,46E-04	1,44E-07	3,26E-04	1,07E-03
	%	69,58	0,01	30,41	100
Media	Abs	1,70E-04	1,63E-04	2,08E-04	5,41E-04
	%	31,36	30,18	38,45	100
Alta	Abs	8,82E-04	3,42E-05	4,57E-04	1,37E-03
	%	64,25	2,49	33,26	100
Promedio Porcentual		55,1	10,9	34,0	

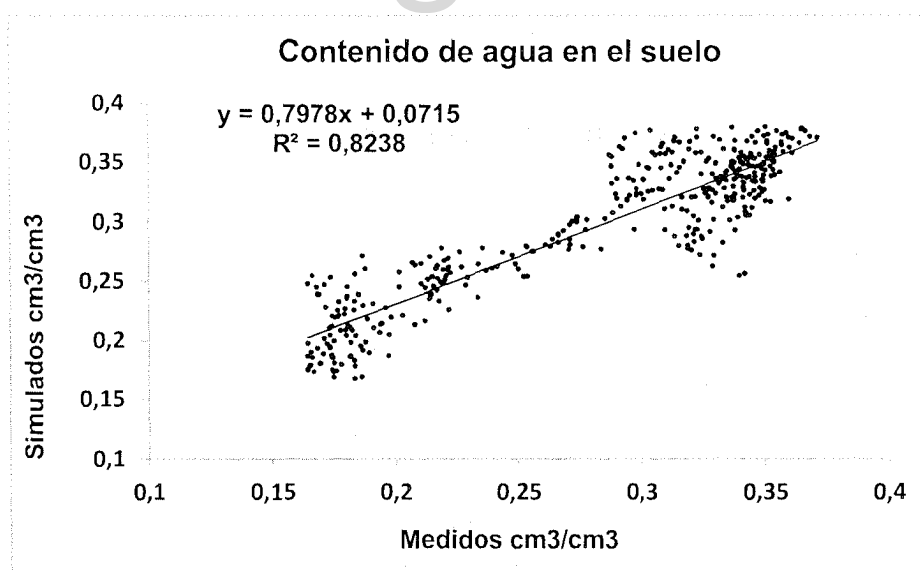


Figura 4. 19. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del contenido de agua en el suelo. para el Modelo 2

Balance hídrico de Mixteque Modelo 2 Drenaje:

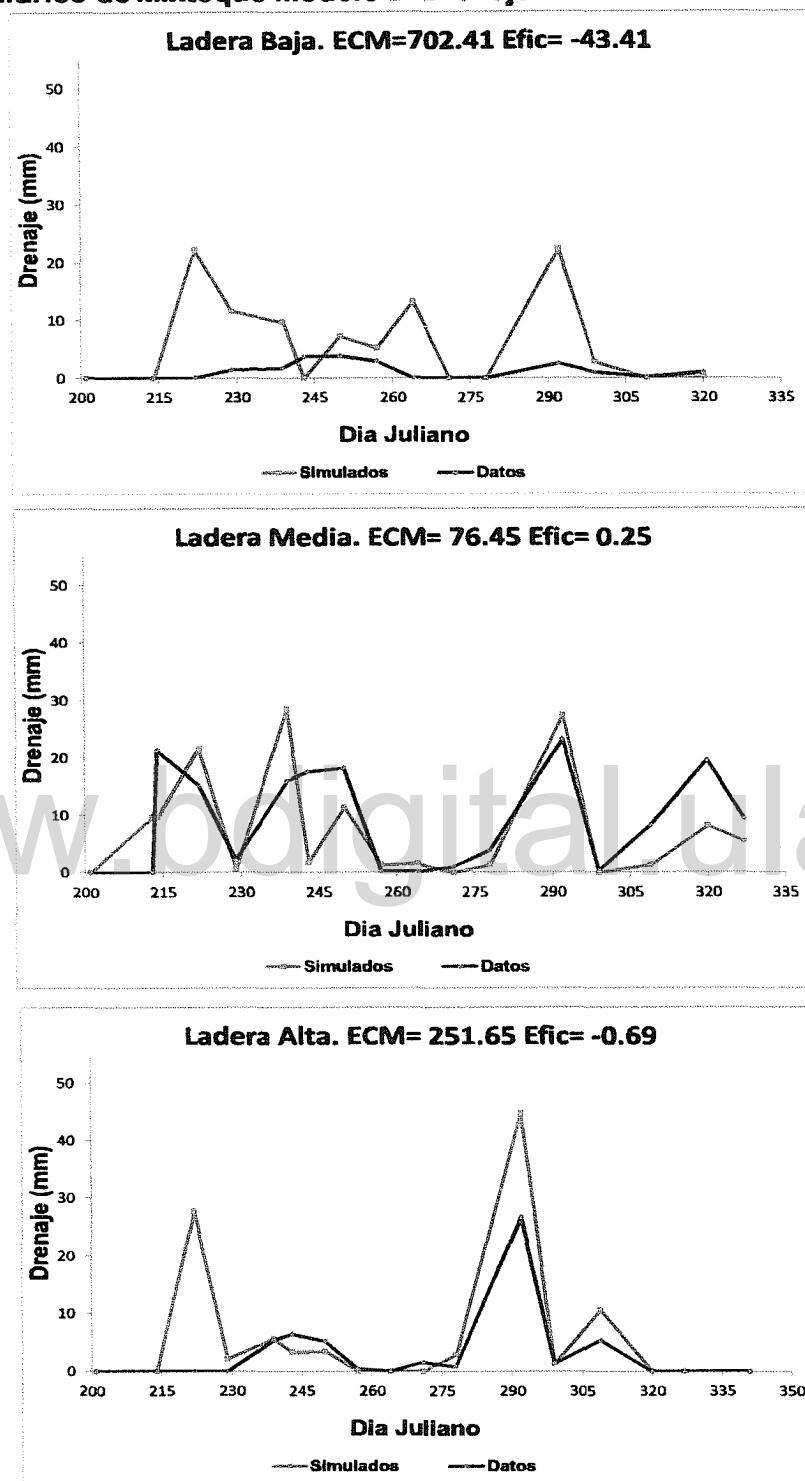


Figura 4. 20. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 2 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

La Figura 4.19 muestra la distribución del drenaje en el experimento de Mixteque en el modelo 2 planteado, se observa que en la ladera baja en gran parte del experimento, el modelo simula más drenaje de lo que se visualiza con los datos, presentando incluso algunos valores que, comparados con los datos, parecieran ser extremos, en esta ladera tanto el porcentaje del error cuadrático medio como el índice de eficiencia son valores que indican que la simulación en esta ladera no es aceptable. En la ladera Media se observa en términos visuales que la simulación es bastante aceptable en todo el experimento a pesar de que el porcentaje del error cuadrático medio es un valor alto. En la ladera Alta se observa que la simulación es aceptable, exceptuando un valor extremo que simula el modelo al principio del experimento y en esta ladera el índice de eficiencia indica que los promedio entre los valores simulados y los datos son similares.

Según el MSEP en la tabla 4.18 se observa que en lo que se refiere al sub proceso de Drenaje se observa que el componente que mejor se simuló fue el de la tendencia, lo que refleja que la simulación fue aceptable en lo que a valores promedios se refiere, por otro lado el 50,9% del error se debe a factores aleatorios. Este modelo presenta un r^2 de 0.35 el cual se puede considerar bajo por otro lado la recta de regresión presenta un sesgo positivo y la pendiente de la recta se encuentra alejada de uno.

Tabla 4. 27. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 2. Drenaje. Descomposición del MSEP según Ladera					
Ladera/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza o Variabilidad	Aleatorio	
Baja	Abs	2,94E+01	4,12E+01	1,92E+01	8,98E+01
	%	32,77	45,87	21,36	100
Media	Abs	3,24E+00	2,90E+00	4,24E+01	4,86E+01
	%	6,66	5,98	87,36	100
Alta	Abs	9,05E+00	3,08E+01	3,13E+01	7,12E+01
	%	12,71	43,31	43,98	100
Promedio Porcentual		17,4	31,7	50,9	

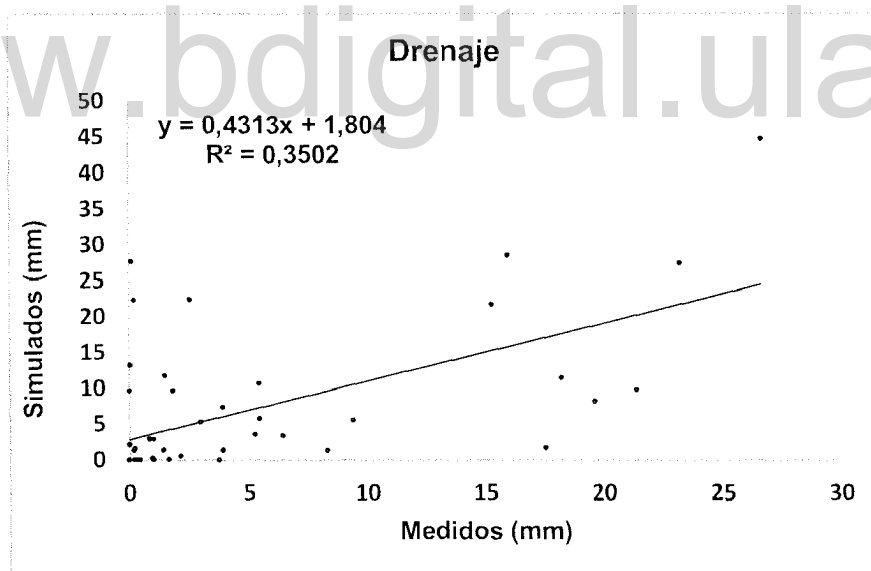


Figura 4. 21 Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del drenaje. para el Modelo 2

4.2.2. Resultados Balance hídrico de Gavidia:

Antes de implementar el modelo 2 en el experimento de Gavidia, es necesario aclarar que en dicho experimento, la longitud de las etapas se determinó a través de un ajuste, ya que como se puede observar en la Tabla 4.28, los valores de cobertura del suelo y de índice de área foliar, son demasiado bajos y nunca llegan a los valores establecidos en (Allen, et al. 1998), en consecuencia la longitud de las etapas, se tendrán que definir, de acuerdo a la distribución de las precipitaciones durante todo el experimento.

Tabla 4. 28. Balance hídrico de Gavidia. Valores Máximos de Cobertura del Suelo e Índice de Área Foliar por Parcelas		
Parcelas	Proporción de Cobertura	Índice de Área Foliar (Dmnl)
[P1]	0.0411	0.07
[P2]	0.0638	0.11
[P3]	0.3774	0.79
[P5]	0.3737	0.78
[P6]	0.2133	0.4
[P8]	0.6664	1.83
[P9]	0.1546	0.28
[P10]	0.5958	1.51
[P11]	0.4984	1.15

En la Figura 4.22 se muestra la distribución de la cantidad de lluvia caída durante todo el experimento, en el mismo se puede tener una idea también de cómo se pueden categorizar las etapas del desarrollo del cultivo en base a la distribución de las precipitaciones.

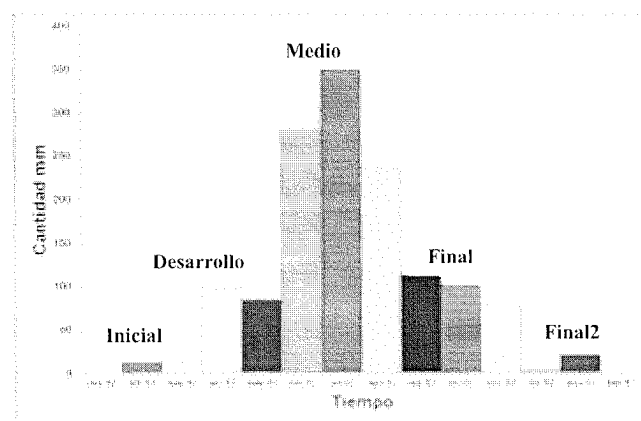


Figura 4. 22 Balance hídrico de Gavidia. Distribución de la Precipitación en el Tiempo (Cantidad mm)

Teniendo una idea de es la dinámica de las precipitaciones, en la Tabla 4.29 se presenta la longitud de las etapas en el experimento de Gavidia, las cuales fueron definidas tomando en cuenta la cantidad de lluvia caída durante el desarrollo del experimento.

Parcelas/ Etapas	Inicial	Desarrollo	Medio	Final	Final 2
Todas	0-83	84-143	144-235	236-281	282-316

Cálculo de los coeficientes del Cultivo:

Una vez definida la longitud de las etapas del desarrollo del cultivo, se procederá al cálculo de los coeficientes respectivos. Para dicho cálculo, en el experimento de Gavidia, recibirá un tratamiento distinto a la forma en la cual se calcularon en el experimento de Mixteque. Quedando definidos por los siguientes lineamientos, el valor del coeficiente inicial ($k_{c_{ini}}$) será único para todas las laderas ya que por las características de las mismas no existe diferencia significativa entre cada una de ellas como para asignarle un coeficiente diferente. Luego para el cálculo del coeficiente medio, éste se hará de acuerdo a los valores del índice de área foliar y en este caso si se asignará un valor para cada ladera, ya que, se disponen de registros de esta variable para cada parcela, con ello, se tratará de diferenciar los flujos que conforman el balance hídrico, y que se encuentran bajo estudio en este trabajo. Respecto al coeficiente final del cultivo se tomará directamente de los

valores tabulados en Allen, et. Al. (1998), y para la etapa FINAL2 se realizará el mismo criterio del coeficiente inicial del cultivo, es decir que éste se calculará en función del número promedio de días que ocurren entre eventos de lluvia.

Coeficiente del cultivo inicial ($k_{c\text{ini}}$)

Similarmente al experimento de Mixteque, en este experimento de Gavidia, para el cálculo del coeficiente inicial del cultivo, éste se hizo en función del total del número de días que ocurren o pasan entre dos eventos de Lluvia, con la ayuda de la Figura 4.21 tomada de . (Allen, et. al 1998). Como se dijo en la sección anterior, en este caso será un valor único para todas las parcelas. La Tabla 4.30, muestra el valor promedio de la evapotranspiración en ese período inicial, de manera conjunta con el promedio de días que transcurren entre eventos de lluvia y el valor del coeficiente inicial del cultivo.

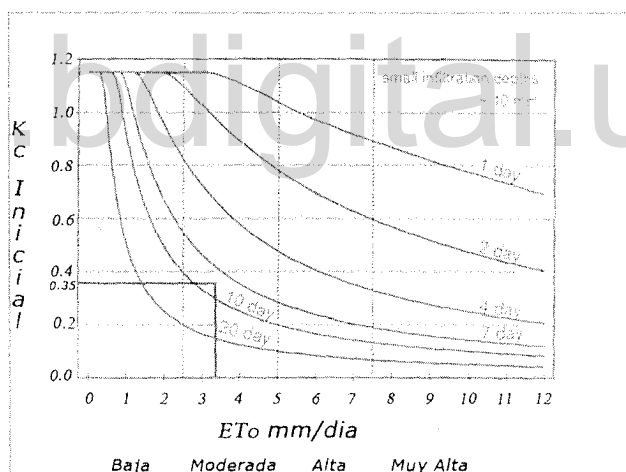


Figura 4. 23 Coeficiente Inicial del cultivo Gavidia.

Fuente: Allen, et. Al. (1998, p.117).

Tabla 4. 30. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 2. Promedio de Días entre eventos de Lluvia, Evapotranspiración Promedio, y Valores del Coeficiente Inicial durante la etapa inicial						
Promedio de días entre eventos de lluvia (Todos)	>1	>2	ETPO (mm)	Kc Todos (Adml)	Kc >1	Kc >2
8,88	16	19,75	3,389	0,35	0,25	0,15

Coeficiente medio del cultivo ($k_{c_{Med}}$)

Para el cálculo del coeficiente medio, se realizó un ajuste en función del índice de área foliar de manera conjunta con los valores tabulados presentados en (Allen, et, al. 1998, p.110). Al realizar dicho ajuste nos damos cuenta que los valores ajustados son menores que los valores del coeficiente inicial del cultivo por lo que contraria a lo dicho en la literatura. Debido a esto, el ajuste de este coeficiente del cultivo se hará en función del proceso de calibración del Vensim, el rango de valores que se implementó para este coeficiente fue: $(0 \leq K_{c_{Med}} \leq 5)$, se tomó este rango de valores, ya que el mejor ajuste en el contenido de agua en el suelo se daba con valores altos, en este caso cercanos a 3, ya que esto implica que hay una pérdida de agua mayor por evapotranspiración cuando el cultivo se encuentra en plena etapa de desarrollo. En la tabla 4.29 se muestran los valores calibrados para el coeficiente del cultivo en la etapa media ($K_{c_{Med}}$).

**Tabla 4. 31. Balance hídrico de Gavidia
Modelo 2. Coeficientes del Cultivo Medio
KcMed Calibrados**

Parcelas	KcMed Calibrado (Adimensional)
P1	3,77
P2	2,93
P3	2,45
P5	0,97
P6	1,84
P8	1,94
P9	3,05
P10	1,94
P11	1,06

Coeficiente del Final ($k_{c_{end}}$):

Para el coeficiente final del cultivo en este caso se tomó el valor tabulado por Allen et al. (1998,p.110), cuyo valor fue de 0.65.

Resultados Modelo 2 Balance hídrico de Gavidia

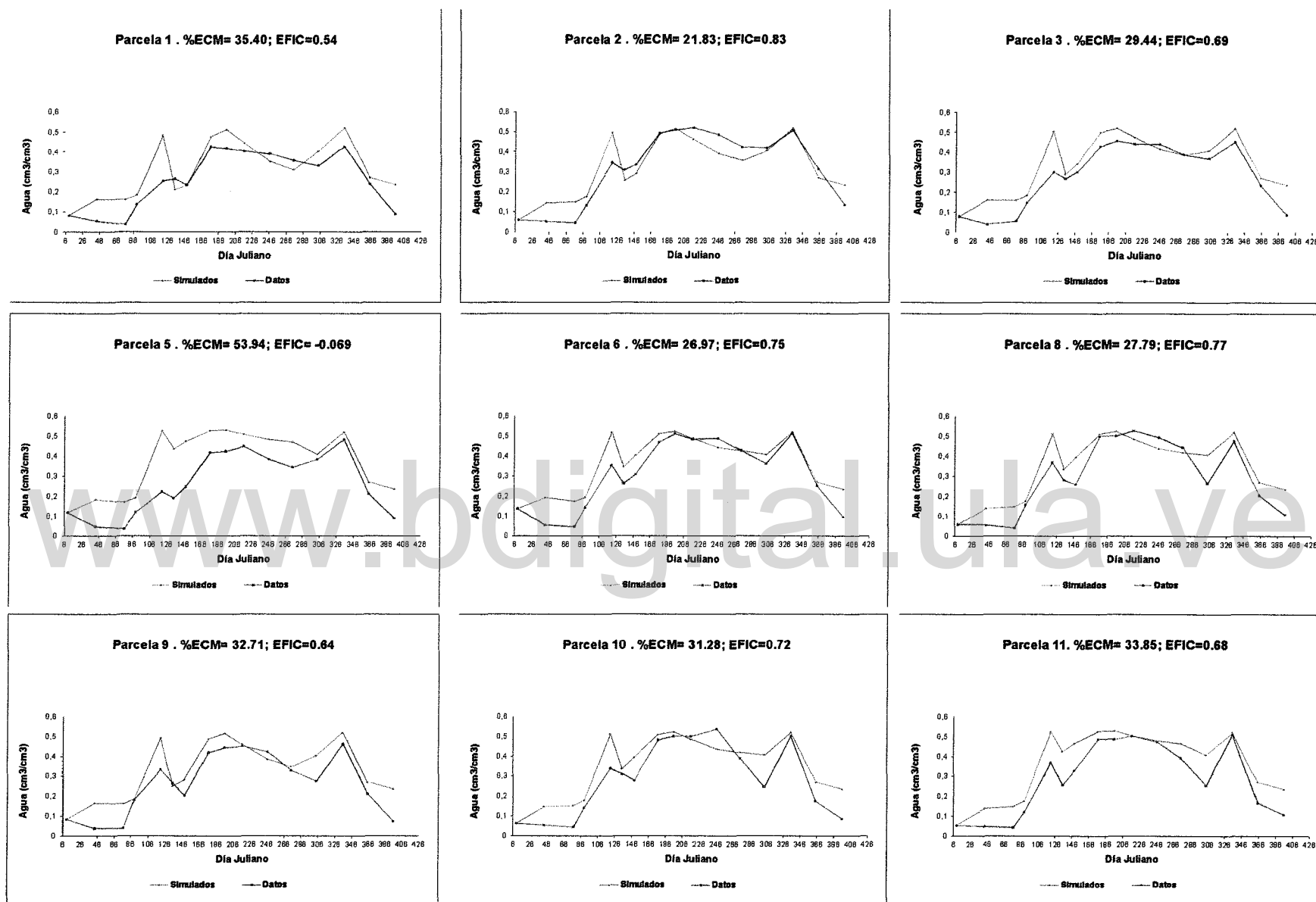


Figura 4. 24 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 2 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

La Figura 4.24 muestra la distribución del agua en el suelo del modelo 2, se observa que en general se obtuvo un buen ajuste de esta variable en todo el experimento, aunque se observa que todavía existe una tendencia del modelo a simular más agua, de la que presentan los datos. Por otro lado, observando el índice de eficiencia, por lo general se obtienen valores que son mayores a 0,5 (exceptuando la parcela 1), por lo que si se excluye esta parcela la simulación según Molnar (2011) es buena.

En la tabla 4.32 se observa la distribución del MSEP por parcela en el contenido de agua en el suelo, se puede ver que en términos absolutos, este índice tiene un rango que abarca desde 4,90E-03 hasta 9,59E-03. Respecto a los términos porcentuales, se destaca que en términos generales se obtuvo un buen ajuste en lo que a variabilidad se refiere, con 5%, por otro lado, en lo que se refiere a la diferencia entre los valores promedios se obtuvo un error del 44,2%, finalmente el componente aleatorio se le atribuye un 50,7% del error. En la recta de regresión el modelo explica el 80% de la variabilidad del contenido de agua en el suelo.

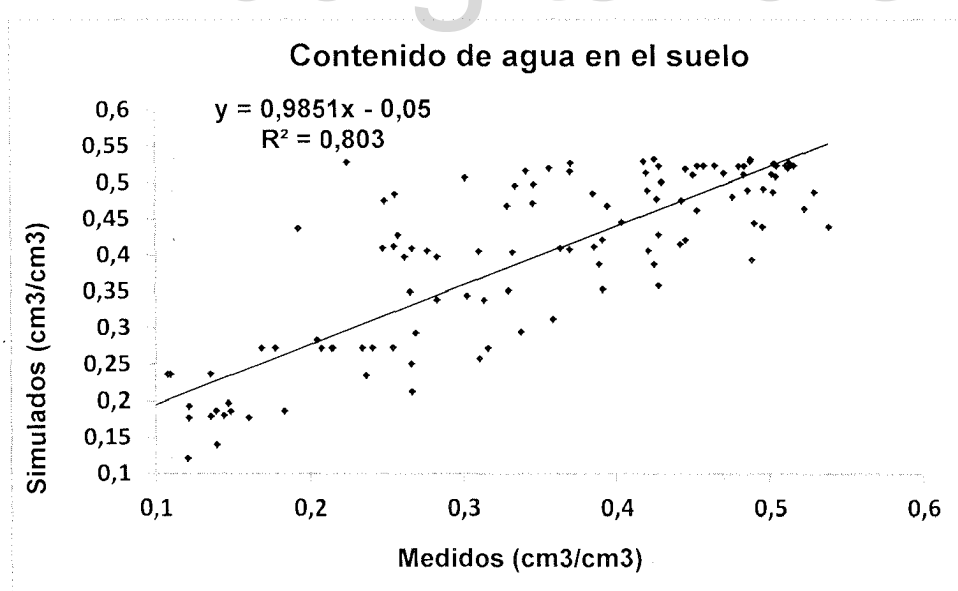


Figura 4. 25. Balance hídrico de Gavidia. Recta de regresión medidos/simulados del Contenido de agua en el suelo para el Modelo 2

Tabla 4. 32. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 2. Contenido de Agua en el suelo. Descomposición del MSEP según Parcelas

Parcela/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza	Aleatorio	
P1	Abs	3,06E-03	1,00E-06	5,47E-03	8,53E-03
	%	35,80	0,00000	64,20	100
P2	Abs	5,34E-05	7,85E-04	4,06E-03	4,90E-03
	%	1,10	16,00	82,90	100
P3	Abs	3,56E-03	6,40E-05	3,27E-03	6,90E-03
	%	51,60	0,90	47,40	100
P5	Abs	1,37E-02	2,00E-06	6,35E-03	2,40E-02
	%	68,30	0,00	31,60	100
P6	Abs	2,97E-03	8,07E-04	2,82E-03	6,60E-03
	%	45,00	12,20	42,80	100
P8	Abs	2,66E-03	4,87E-04	3,72E-03	6,86E-03
	%	38,70	7,10	54,20	100
P9	Abs	3,91E-03	7,20E-05	3,63E-03	7,62E-03
	%	51,40	0,90	47,70	100
P10	Abs	3,37E-03	6,47E-04	4,39E-03	8,40E-03
	%	40,10	7,70	52,20	100
P11	Abs	6,28E-03	1,22E-04	3,18E-03	9,59E-03
	%	65,50	1,30	33,20	100
Promedio Porcentual		44,17	5,12	50,69	100,0

Balance hídrico de Gavidia Modelo 2 Drenaje:

Respecto al sub proceso de drenaje, mostrado en la Figura 4.23, se observa un buen ajuste entre las dos series de datos. En este caso, exceptuando las parcelas 2 y 5, el índice de eficiencia para las demás parcelas son valores que son mayores a 0,7 lo cual nos indica que la simulación es muy buena según Molnar (2011) para esta variable.

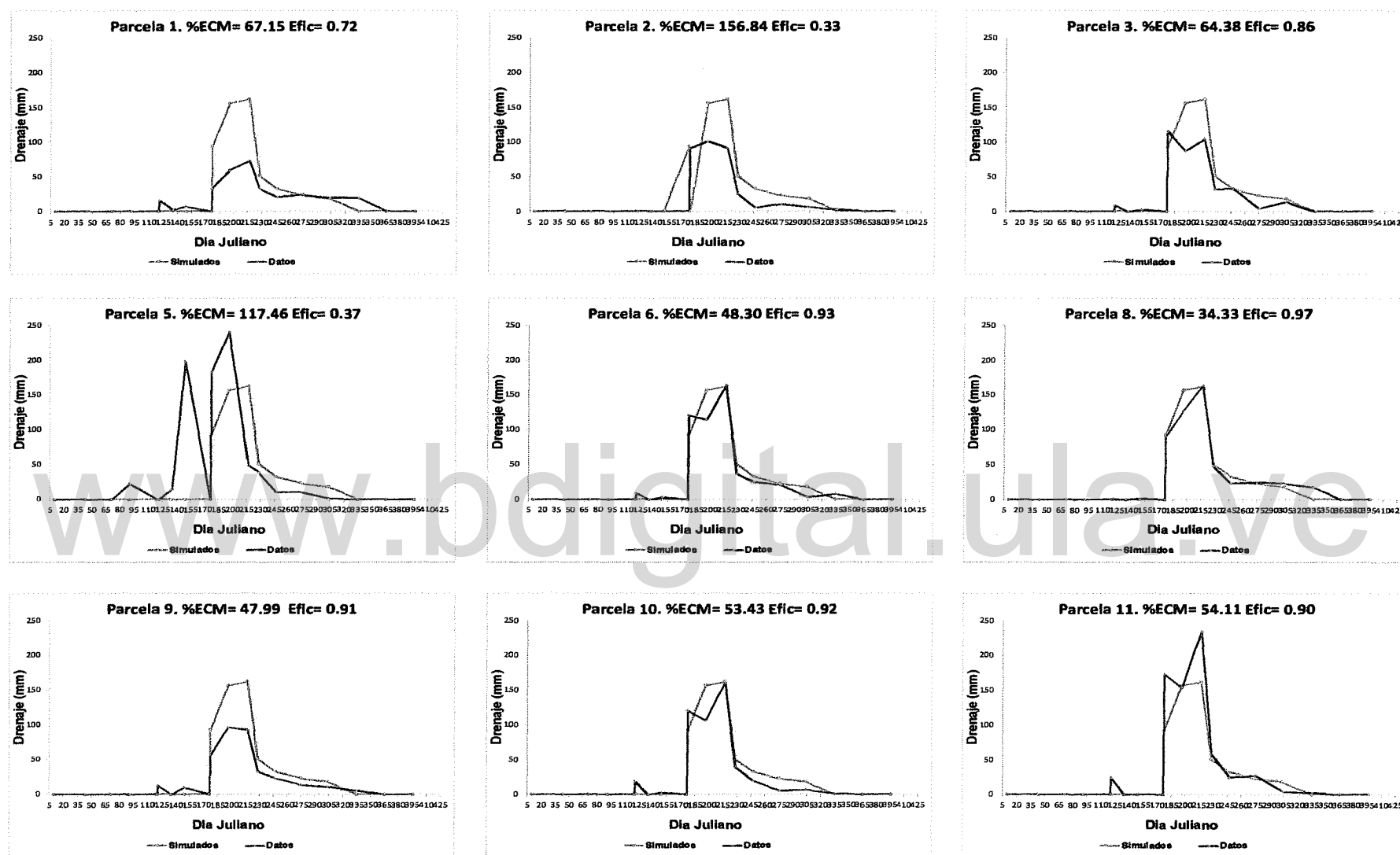


Figura 4. 26 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 2 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

La tabla 4.33 se puede observar que en general el MSEP expresado en términos absolutos, varía desde $1,32\text{E}+02$ hasta $8,50\text{E}+02$. Por otro lado, en términos de proporción, se ve que el mayor porcentaje del error se obtiene del componente aleatorio, con un 72,02% seguido por las diferencias entre las varianzas con un 24,32%, quedando por último las diferencias entre los valores promedios con un 3,65%, siendo este último componente el que mejor ajuste se obtuvo, por lo que este modelo en este experimento simula bien los valores promedios del drenaje. La recta de regresión muestra que el modelo explica el 75% de la variabilidad del drenaje.

Tabla 4. 33. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 2. Drenaje. Descomposición del MSEP según Parcelas					
Parcela/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza	Aleatorio	
P1	Abs	1,33E+01	6,76E+00	1,12E+02	1,32E+02
	%	10,04	5,11	84,85	100
P2	Abs	2,75E+00	1,89E+00	8,45E+02	8,50E+02
	%	0,32	0,22	99,45	100
P3	Abs	3,33E+00	3,63E+00	2,01E+02	2,08E+02
	%	1,60	1,74	96,66	100
P5	Abs	7,81E-01	2,67E+02	3,54E+03	2,40E-02
	%	0,02	7,03	92,95	100
P6	Abs	6,97E+00	1,05E+00	1,77E+02	1,85E+02
	%	3,76	0,57	95,67	100
P8	Abs	3,34E+05	5,09E+06	2,25E+05	5,65E+06
	%	5,90	90,12	3,98	100
P9	Abs	2,22E+05	3,44E+06	1,12E+05	3,77E+06
	%	5,89	91,15	2,96	100
P10	Abs	6,92E+00	2,63E+00	1,96E+02	2,05E+02
	%	3,37	1,28	95,35	100
P11	Abs	1,04E+01	1,13E+02	3,99E+02	5,22E+02
	%	1,98	21,68	76,34	100
Promedio Porcentual		3,65	24,32	72,02	100

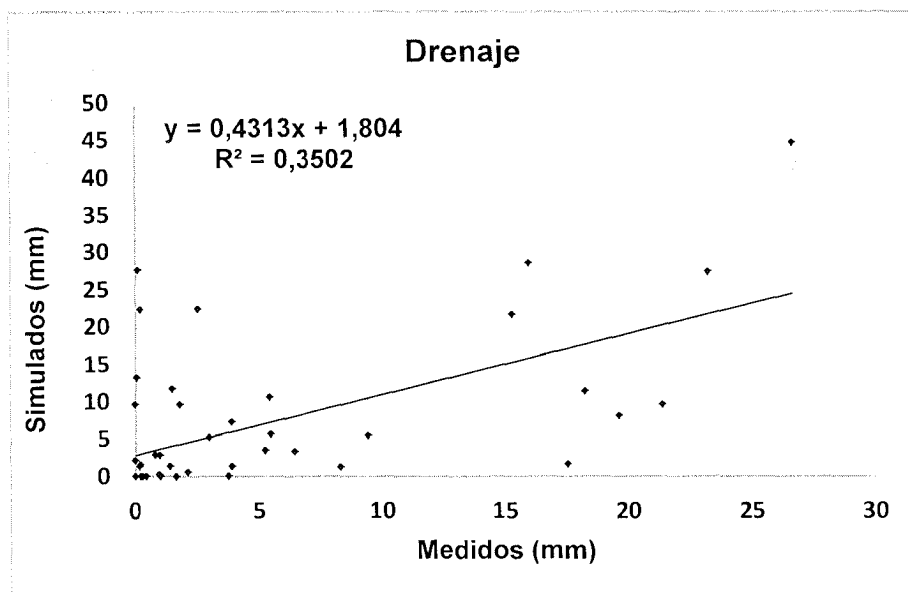


Figura 4. 27. Balance hídrico de Gavidia. Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 2

4.3. *Modelo 3 Base con $ET_{c_{Adj}}$*

4.3.1. Balance hídrico del Experimento de Mixteque:

En un primer paso se procederá a calcular los respectivos coeficientes que son: Coeficiente Basal del cultivo, que recoge los efectos del cultivo que intervienen en el sub proceso de la transpiración de las plantas, y el coeficiente de evaporación del suelo que hace lo propio en el sub proceso de evaporación del suelo.

El cálculo del coeficiente basal:

Como primer paso para calcular el coeficiente basal, se identifican las etapas del cultivo para luego seleccionar los respectivos valores del coeficiente de acuerdo al tipo del cultivo y de acuerdo a la etapa la cual se encuentre el mismo. La clasificación de las etapas en este experimento de Mixteque son las mismas a las seleccionadas en la Tabla 4.34 que se presentan nuevamente a continuación:

Tabla 4. 34 Balance hídrico de Mixteque. Duración de las Etapas (días) según Laderas					
Laderas / Etapas	Inicial	Desarrollo	Medio	Final	Final 2
Baja	0-39	40-73	74-83	84-112	112-113
Media	0-43	44-71	72-92	93-128	129-143
Alta	0-44	45-93	93-93	94-143	143-145

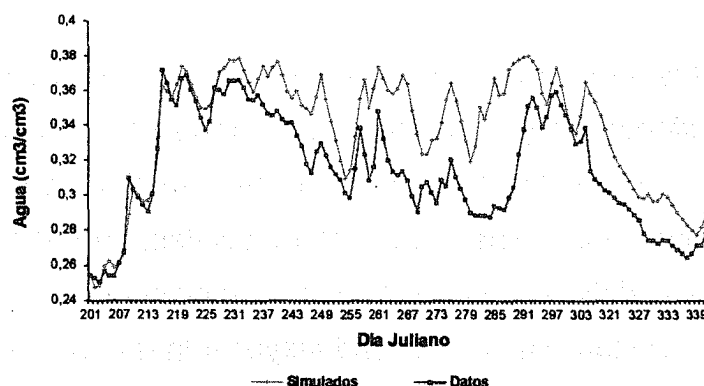
Por otro lado, la tabla 4.35 presenta los valores del coeficiente basal de transpiración de cultivos basados en : Allen, et al. (1998. pp 137).

Tabla 4. 35. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 3. Valores del Coeficiente del Basal del cultivo (Adimensional) según Laderas, por Etapas				
Laderas/Etapas	Inicial	Media	Final	Final 2
Baja	0,15	1,1	0,65	0,15
Media	0,15	1,1	0,65	0,15
Alta	0,15	1,1	0,65	0,15

Fuente: Allen, et al. (1998. pp 137).

Resultados Modelo 3 Balance hídrico de Mixteque

Ladera Baja. %ECM= 9.38; EFIC= 0.14



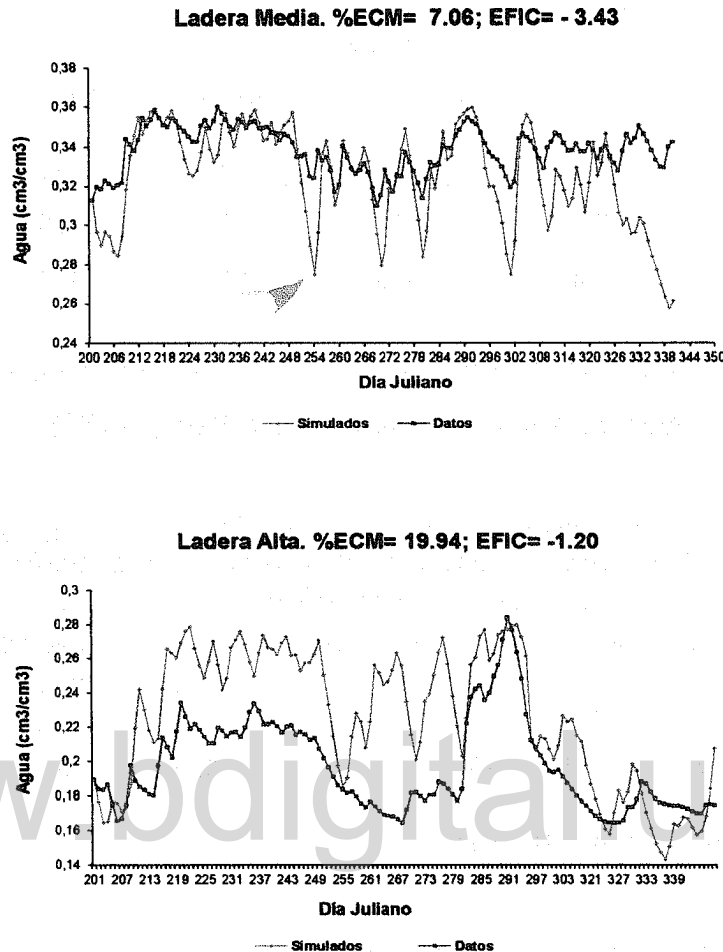


Figura 4. 28 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 3 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

La Figura 4.28 presenta la distribución del contenido de agua en el suelo en el experimento de Mixteque para el modelo 3. Se observa que en la ladera baja el ajuste es bastante aceptable en el período inicial del experimento que corresponde a la etapa inicial y una pequeña parte de la etapa del desarrollo del cultivo, al igual que lo hace los dos modelos anteriores, En la ladera media se puede observar que el modelo sigue simulando una variabilidad mayor a la que presentan los datos, por lo que ha sido una constante en esta ladera, en los tres modelos desarrollados hasta ahora, y en la ladera alta se ve que al final del experimento el ajuste fue mejor, comparándolo con los dos modelos anteriores, lo que nos lleva a

concluir que el hecho de incorporar la variable **Mulch** al final del experimento logró un mejor ajuste en esta ladera. En lo que se refiere al Porcentaje del Error Cuadrático Medio se observa que el rango de variación oscila entre el 7 al 20% por lo que según Molnar (2011) la simulación es buena. Respecto al Índice de Eficiencia la simulación es insuficiente.

Tabla 4. 36. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 3. Contenido de Agua en el Suelo. Descomposición del MSEP según Ladera					
Ladera/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza o Variabilidad	Aleatorio	
Baja	Abs	5,12E-04	6,97E-06	3,50E-04	8,70E-04
	%	58,91	0,80	40,29	100
Media	Abs	1,77E-04	1,93E-04	2,02E-04	5,71E-04
	%	30,89	33,79	35,32	100
Alta	Abs	7,60E-04	1,72E-04	6,06E-04	1,54E-03
	%	49,40	11,20	39,40	100
Promedio Porcentual		46,4	15,3	38,3	

En la tabla 4.36 se observa la descomposición de la proporción del MSEP, es de destacar, que en la ladera media, es la que menor error obtuvo del MSEP, el 30,8% del error se le atribuye a diferencia entre los promedio, el 33,8% se le puede atribuir a diferencias entre las varianzas, y un 35,4% se le atribuye al error aleatorio, de forma general el componente que menor margen de error es el de, las varianzas con un 15,3%. Por lo que se puede concluir que éste fue el componente que mejor se modeló en el sub proceso del contenido de agua en el suelo. La recta de regresión muestra que el contenido de agua en el suelo es explicado en un 80% por el modelo 3.

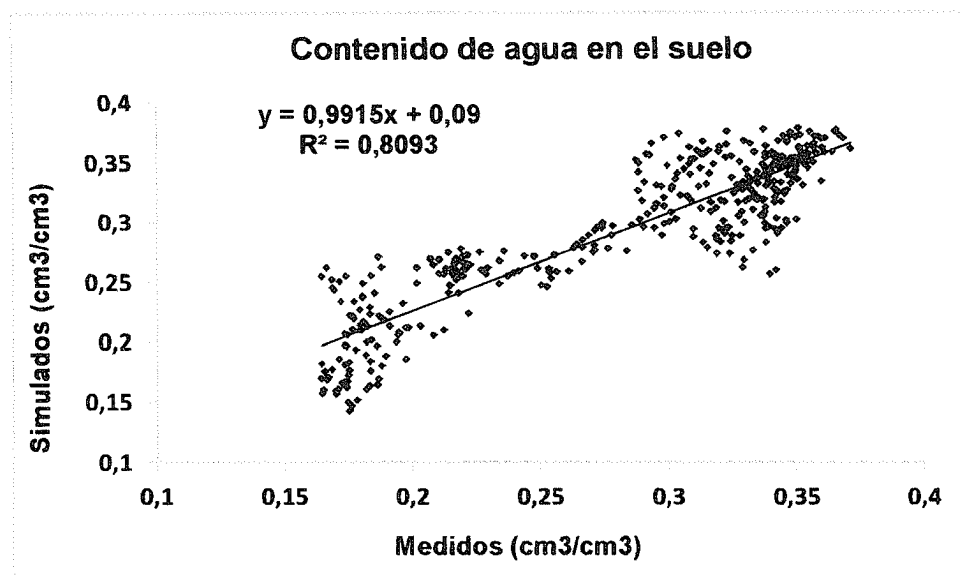
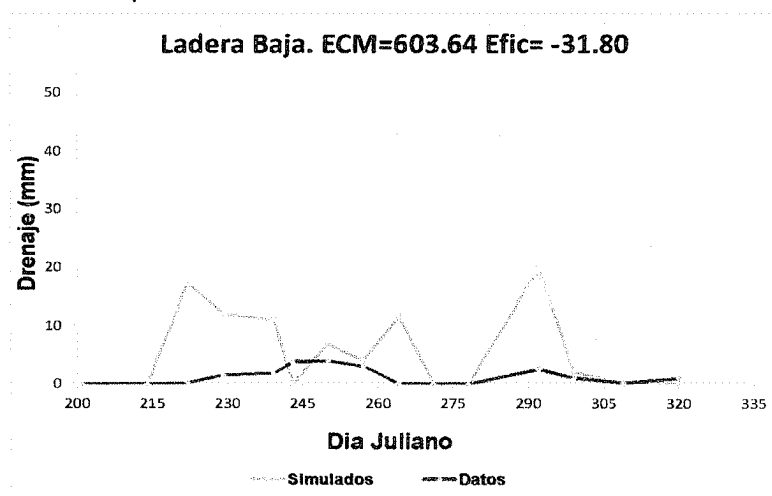


Figura 4. 29. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del contenido de agua en el suelo para el Modelo 3

En lo que se refiere al sub proceso de Drenaje mostrado en la Figura 4.25, se puede observar que en la ladera Baja gran parte del ciclo del experimento sobreestima a los datos originales, en la ladera media se observa que existe un buen ajuste a partir del período medio que es cuando el cultivo se encuentra en pleno desarrollo y al final del experimento, respecto a la ladera alta en general no presenta cambios significativos entre el ajuste de los datos con los valores simulados, destacando que después del período inicial del experimento el ajuste se puede observar que es bastante bueno.



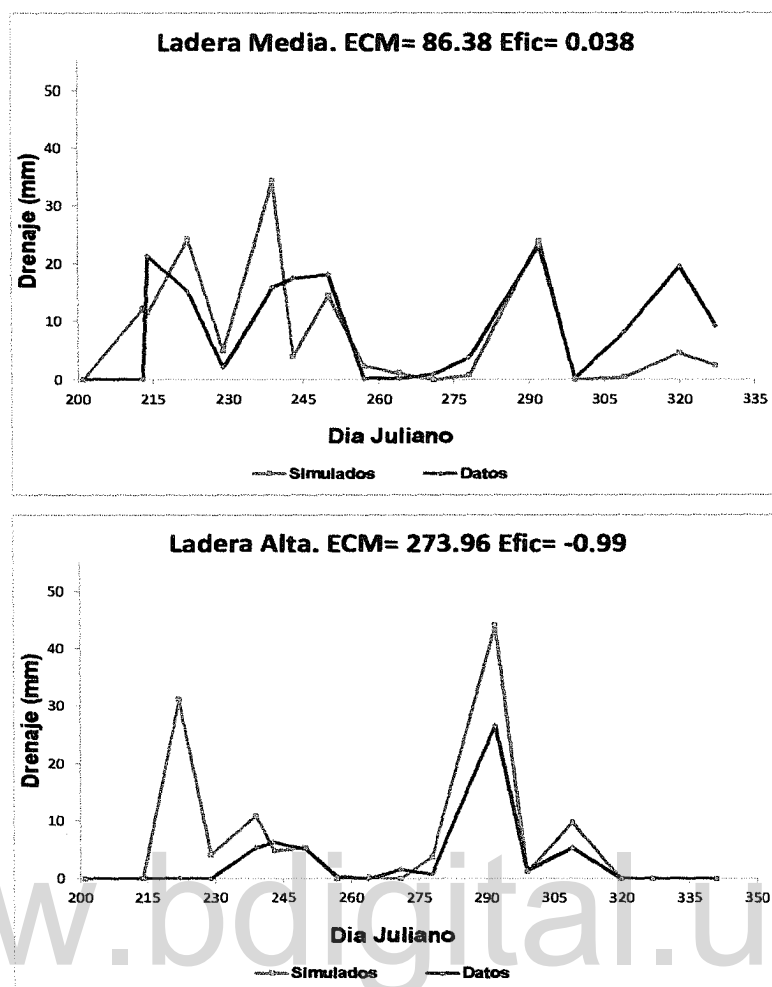


Figura 4. 30 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje el Modelo 3 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

En la descomposición del MSEP en el subproceso de Drenaje se observa en la tabla 4.35 que el mejor ajuste se obtuvo en la ladera media, seguido de la ladera baja, y en la ladera alta fue donde mayor margen de error se obtuvo. En términos de proporción, se observa que el componente que mayor proporción obtuvo margen de error es el componente aleatorio con un 51,6%, seguido de las diferencias de variabilidad con un 31,2% y el componente que mejor se simuló fue el de las diferencias de los promedios con un 17,1%. Y la recta de regresión muestra que el modelo explica 35% de la variabilidad del drenaje, lo que se puede considerar como una pobre estimación.

Tabla 4. 37. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 3. Drenaje. Descomposición del MSEP según Ladera					
Ladera/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza o Variabilidad	Aleatorio	
Baja	Abs	2,15E+01	2,88E+01	1,65E+01	6,68E+01
	%	32,20	43,08	24,72	100
Media	Abs	9,92E-01	7,35E+00	5,66E+01	6,49E+01
	%	1,53	11,32	87,15	100
Alta	Abs	1,49E+01	3,31E+01	3,62E+01	8,42E+01
	%	17,71	39,30	42,99	100
Promedio Porcentual		17,1	31,2	51,6	

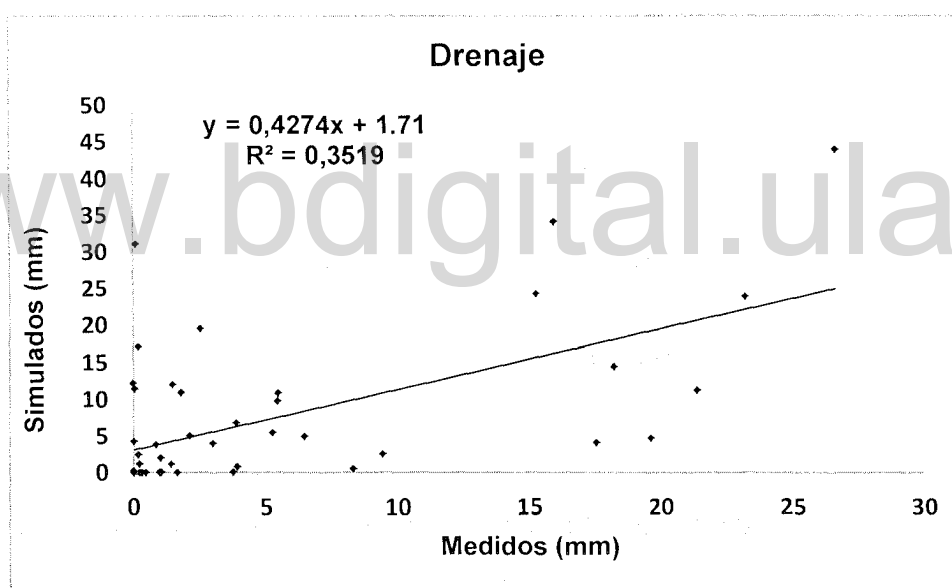


Figura 4. 31. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 3

4.3.2. Modelo 3. Balance hídrico Gavidia:

Similar, a lo procedido en el experimento de Mixteque, aquí en el experimento de Gavidia, en la Tabla 4.38 se muestra nuevamente la distribución de las etapas del experimento con las características descritas anteriormente. Para la implementación del coeficiente basal se usó los tabulados presentados en Allen, et, al. (1998, p. 137), y para el cálculo del coeficiente de evaporación también se utilizó el procedimiento presentado por el autor mencionado anteriormente.

Tabla 4. 38. Balance hídrico de Gavidia. Duración de las Etapas (Días) según Parcelas					
Parcelas/ Etapas	Inicial	Desarrollo	Medio	Final	Final 2
Todas	0-83	84-143	144-235	236-281	282-316

A continuación se presenta los resultados del modelo tres desarrollado, para el experimento de Gavidia:

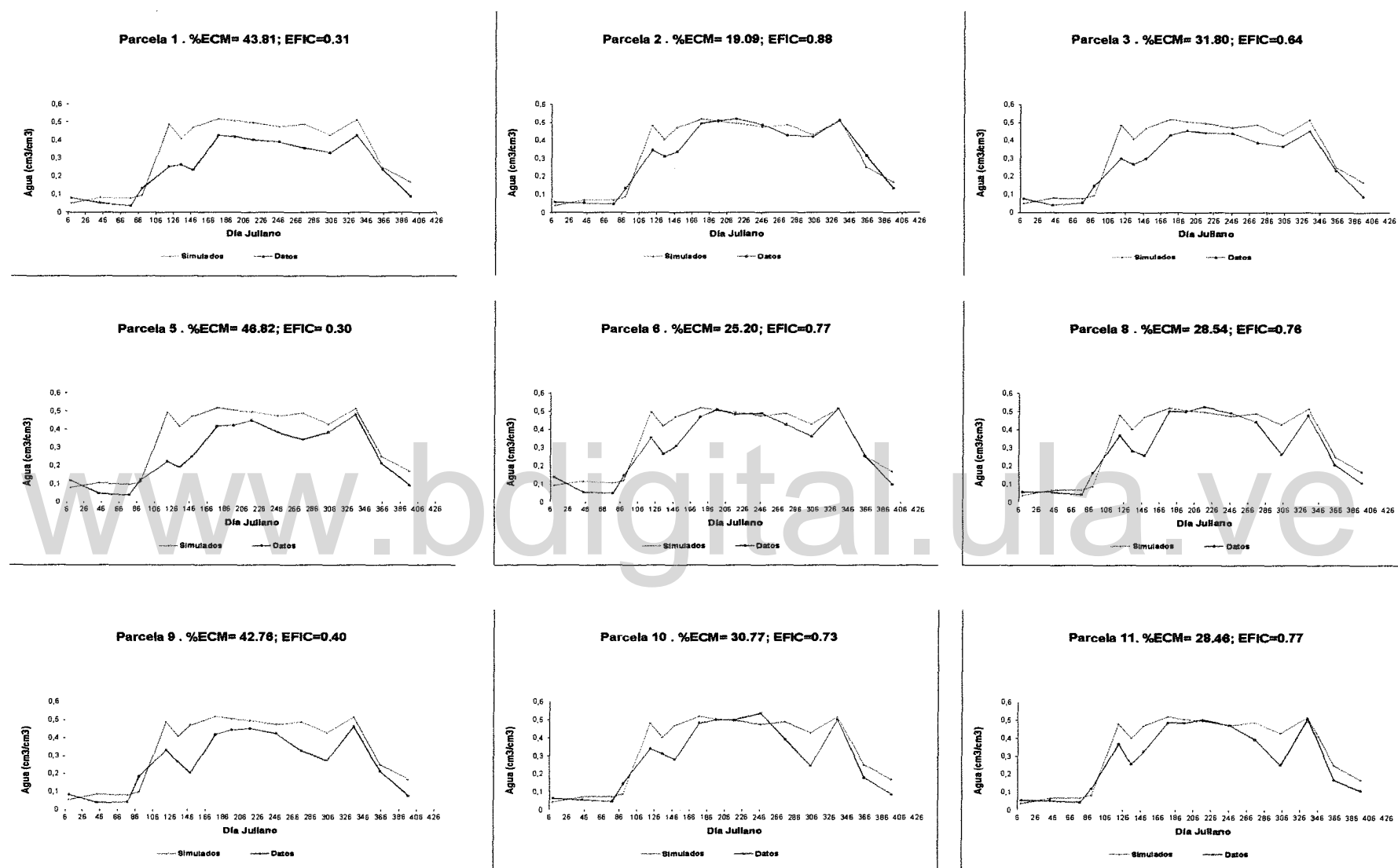


Figura 4. 32 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 3 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

La distribución del contenido de agua en el suelo por parcela se muestra en la Figura 4.32 es de notar que por lo general este modelo aún sigue simulando más agua que la que en realidad hay, aunque el ajuste al final del experimento es bastante bueno para todas las parcelas, por lo que en este modelo la idea de incorporar la variable **mulch** ayudo a mejorar el ajuste entre los datos y los valores simulados. Por otro lado se observa que el índice de eficiencia tiene un rango que va desde 0,30 hasta 0,88, lo cual nos da algún indicio de que la simulación se puede considerar como aceptable ya que en este rango de valores la clasificación según Molnar (2011) va desde satisfactorio hasta excelente.

Tabla 4. 39. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 3. Contenido de Agua en el Suelo. Descomposición del MSEP según Ladera

Parcela/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza	Aleatorio	
P1	Abs	2,45E+02	1,85E-03	3,76E-03	2,45E+02
	%	99,998	0,001	0,002	100
P2	Abs	5,22E-04	1,39E-04	3,09E-03	3,75E-03
	%	13,94	3,72	82,34	100
P3	Abs	4,18E-03	9,50E-04	2,92E-03	8,05E-03
	%	51,94	11,80	36,25	100
P5	Abs	8,15E-03	7,20E-04	6,25E-03	2,40E-02
	%	53,89	4,76	41,35	100
P6	Abs	2,15E-03	4,38E-05	3,88E-03	6,07E-03
	%	35,39	0,72	63,89	100
P8	Abs	2,01E-03	1,34E-04	5,09E-03	7,24E-03
	%	27,77	1,85	70,38	100
P9	Abs	6,50E-03	1,06E-03	5,46E-03	1,30E-02
	%	49,91	8,17	41,92	100
P10	Abs	2,62E-03	7,48E-05	5,44E-03	8,14E-03
	%	32,22	0,92	66,87	100
P11	Abs	2,83E-03	1,64E-04	3,78E-03	6,78E-03
	%	41,78	2,42	55,79	100
Promedio Porcentual		45,20	3,82	50,98	100,0

En el cálculo del MSEP mostrado en la tabla 4.39, observando los valores absolutos nos damos cuenta que tiene un rango que abarca desde $6,78E-03$ hasta $2,45E+02$, lo cual nos indica que tienen una variabilidad baja, ahora, visto desde el punto de vista porcentual, en términos generales, se observa que el componente que mejor se simuló fue el de la variabilidad con el 3,82% de error, por lo que en este modelo el contenido de agua en el suelo, las varianzas entre los datos y los valores simulados fueron bastantes similares, seguido luego por la diferencias entre el sesgo y el error aleatorio respectivamente. La figura 4.33 muestra la recta de regresión donde se observa que el modelo explica el 83% de la variabilidad del contenido de agua en el suelo.

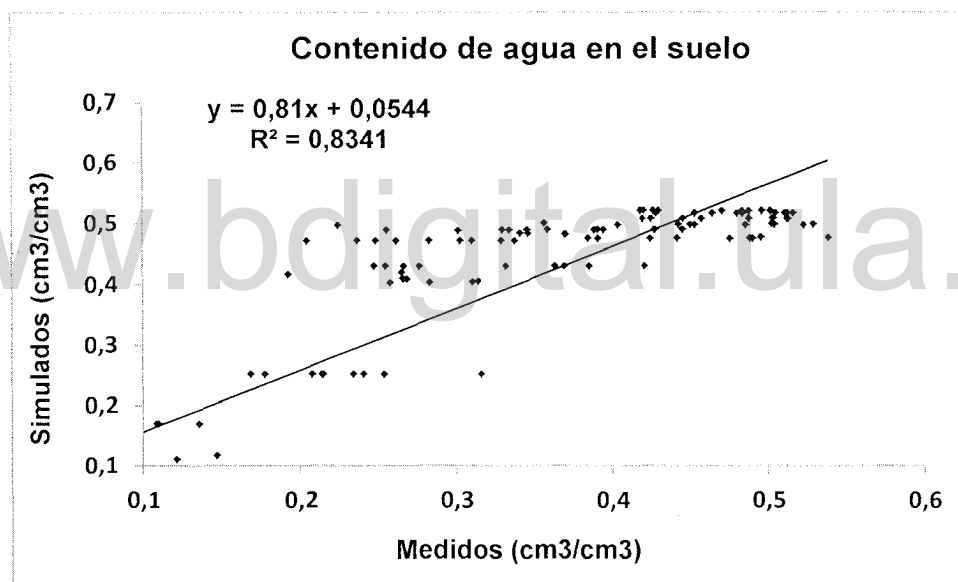


Figura 4. 33. Balance hídrico de Gavidía Recta de regresión medidos/simulados del contenido de agua en el suelo para el Modelo 3

En lo que se refiere al sub proceso de Drenaje, la Figura 4.34 muestra su distribución por parcela para este modelo 3 planteado, en él se puede ver que en la mayoría de las parcelas el modelo simula más drenaje, en comparación con los datos reales, a pesar de que las tendencias en términos del comportamiento de las dos series si tienden a parecerse. El rango tan amplio del índice de eficiencia

que va desde -3,88 hasta su valor máximo 0,89 nos indica de forma general que en este caso la simulación en esta variable no es muy buena.

En la tabla 4.40, se muestra el cálculo del MSEP para todas las parcelas en el sub proceso de Drenaje, el rango de valores de este error en términos absolutos va desde $2,40\text{E}-02$ hasta $2,54\text{E}+03$, lo que se puede considerar como amplio. En lo que se refiere a términos de proporción se observa, en términos generales, que el componente que mejor se pudo simular en este modelo fue el sesgo con un 19,55% de margen de error, seguido por la variabilidad con 35,21%, quedando el resto del margen de error en el componente aleatorio. En la regresión mostrada en la Figura 4. 34 se observa que el modelo explica el 65% de la variabilidad del drenaje.

Tabla 4. 40. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 3. Drenaje. Descomposición del MSEP según Ladera					
Parcela/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza	Aleatorio	
P1	Abs	4,91E+02	1,49E+03	1,58E+02	2,14E+03
	%	22,98	69,63	7,39	100
P2	Abs	4,26E+02	6,24E+02	1,49E+03	2,54E+03
	%	16,78	24,55	58,67	100
P3	Abs	2,85E+02	4,86E+02	2,28E+02	9,99E+02
	%	28,55	48,65	22,80	100
P5	Abs	1,72E+01	3,22E+02	3,87E+03	2,40E-02
	%	0,41	7,65	91,94	100
P6	Abs	1,27E+02	1,16E+02	2,47E+02	4,90E+02
	%	25,89	23,71	50,40	100
P8	Abs	1,03E+02	1,47E+02	1,43E+02	3,93E+02
	%	26,33	37,37	36,30	100
P9	Abs	3,81E+02	8,57E+02	7,33E+01	1,31E+03
	%	29,05	65,36	5,59	100
P10	Abs	1,56E+02	1,37E+02	3,11E+02	6,04E+02
	%	25,91	22,65	51,44	100
P11	Abs	4,88E-02	9,42E+01	4,49E+02	5,43E+02
	%	0,01	17,35	82,64	100
Promedio Porcentual		19,55	35,21	45,24	100,0

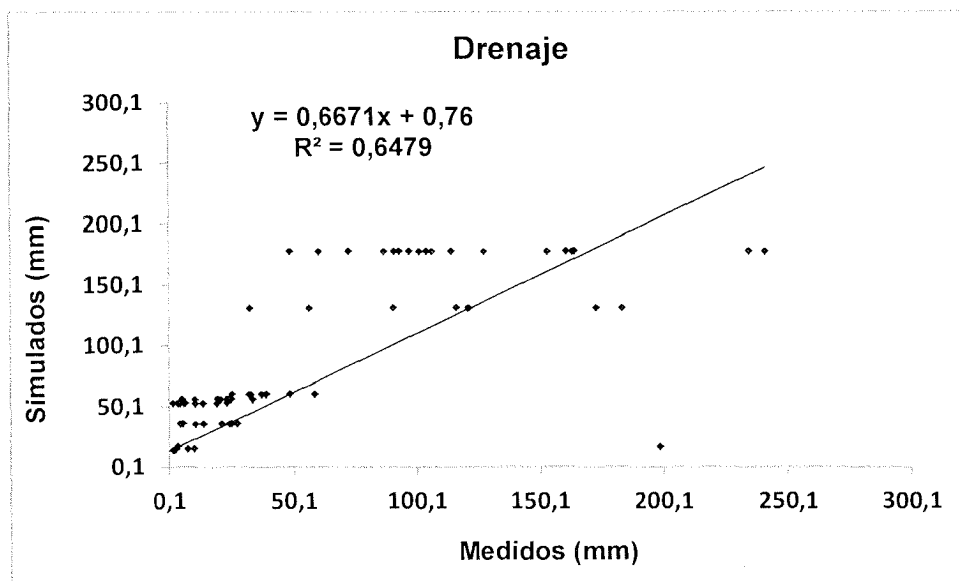


Figura 4. 34. Balance hídrico de Gavidia Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 3

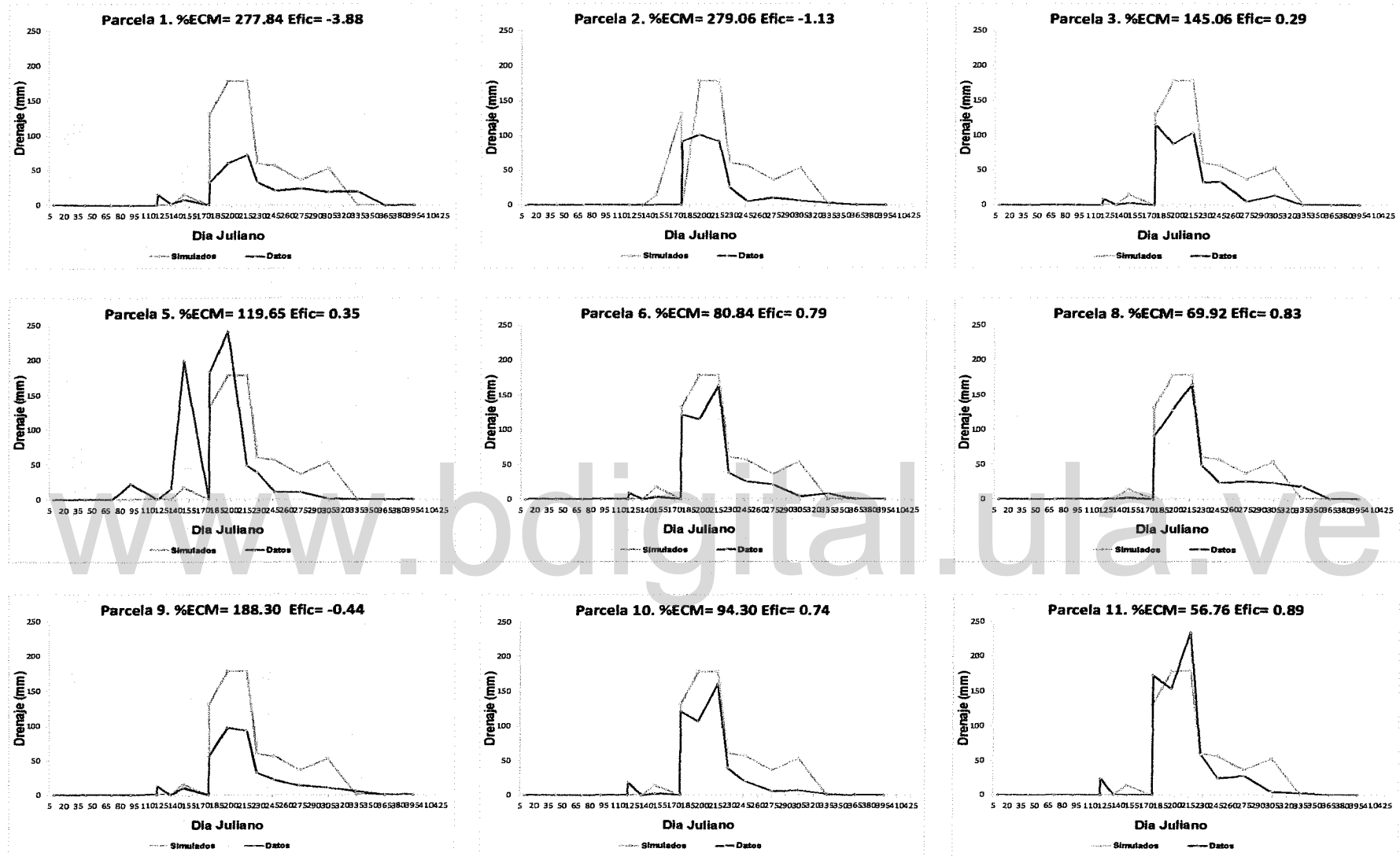


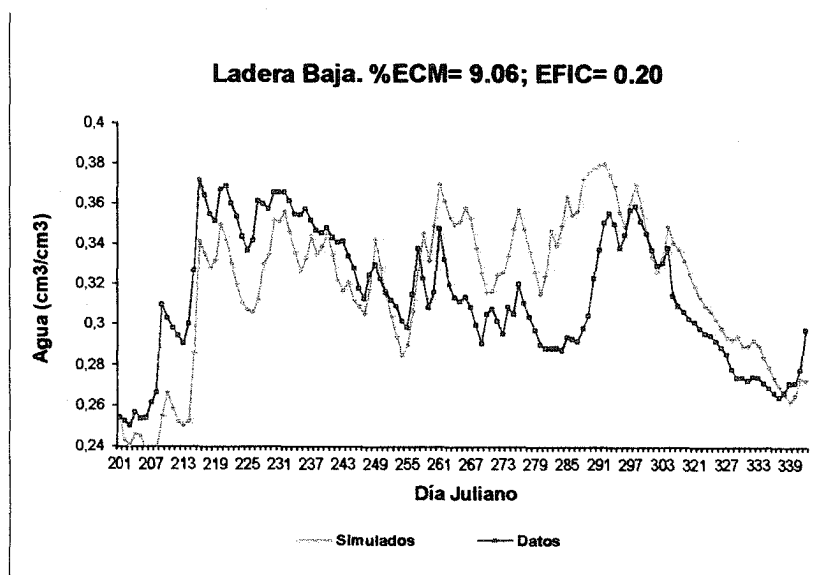
Figura 4. 35 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 3 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

4.4 Resultados Modelo 4 Balance para Suelo Desnudo:

Antes de mostrar los resultados de este modelo, es necesario recordar que este modelo tiene consigo un parámetro “calibra” descrito en el capítulo III, el cual hace que aumente la evaporación del suelo, y que tiene que ser calibrado. Los resultados de la calibración se muestran en la tabla 4.41. Se observa que el valor sólo varía en la Ladera Alta, en consecuencia en esta ladera la evaporación aumenta en 1,59 en relación con su valor original de Penmann para suelo desnudo.

Tabla 4. 41. Balance hídrico de Mixteque. Valor Calibrado Evaporación del Suelo	
Laderas	Valor Calibrado (Adimensional)
Baja	1
Media	1
Alta	1,59

4.4.1 Balance hídrico de Mixteque:



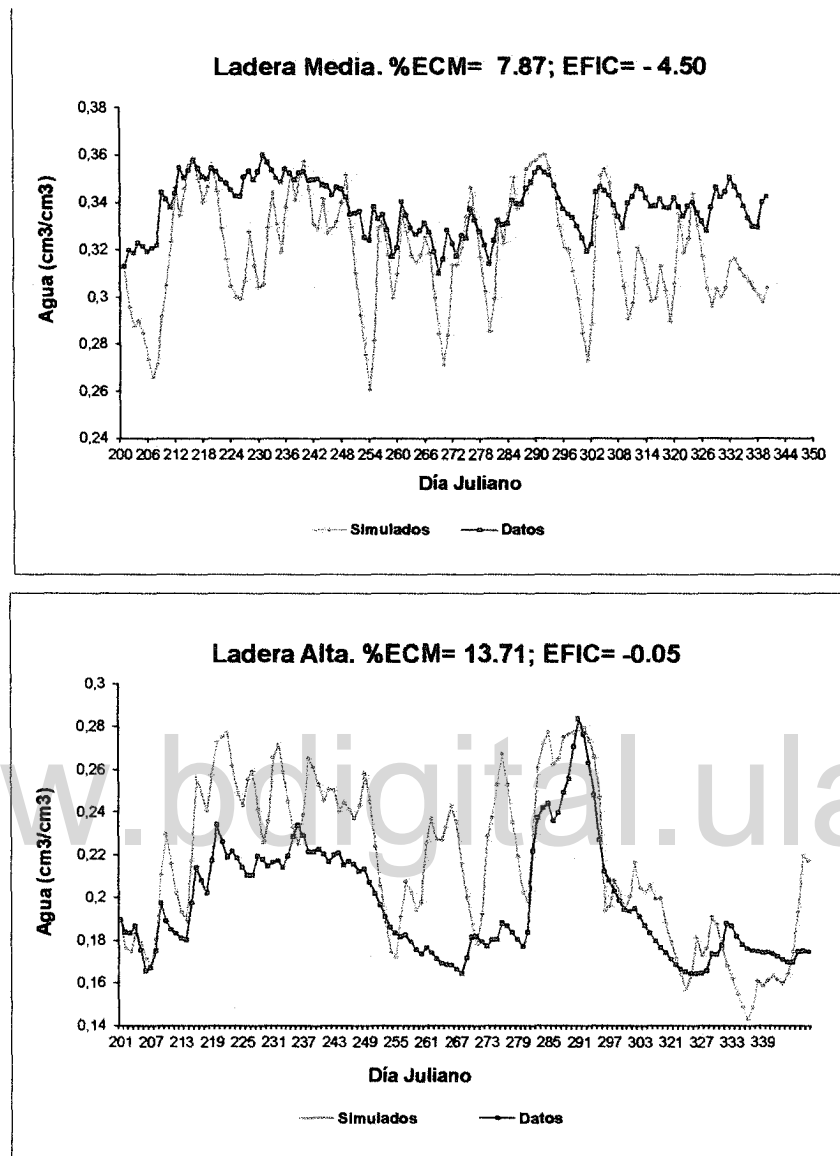


Figura 4. 36. Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 4 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

La Figura 4.36 presenta la distribución del contenido de agua en el suelo, según el modelo 4 planteado, respecto a la ladera baja se observa un buen ajuste en casi todo el experimento desde el inicial hasta parte de la etapa media donde el cultivo se encuentra desarrollado. Luego en la etapa final, hay un pequeño desajuste seguidamente en la otra parte final del experimento que incluye una porción del

suelo se encuentra desnudo el ajuste es bueno. En la ladera media se puede ver que la variabilidad de los valores simulados es mayor que la que presenta los datos. Esto ha sido una constante en todos los experimentos. En la ladera alta se observa que el ajuste en el período inicial mejora notablemente comparado con el modelo 3, sin embargo exceptuando la parte final del experimento donde el ajuste es aceptable, en el resto del experimento por lo general se sobreestima el contenido de agua en el suelo. En lo que se refiere al Porcentaje del Error Cuadrático Medio se observa de forma general que dicho error no sobrepasa el 16% por lo que según Molnar (2011) la simulación puede ser considerada como buena. Por otra parte en el Índice de Eficiencia los el rango de valores va desde -4,50 hasta 0,20.

En la tabla 4.42 se puede observar la descomposición del MSEP, se observa que se observa que el 32,7% del error se atribuye a diferencias entre los valores promedios, es de destacar que el 11,7% del error se debe a diferencias entre las variaciones, y el 55,5% del error se debe al componente aleatorio. En la regresión mostrada en la Figura 4.37. se observa que este modelo explica el 81% de la variabilidad del contenido de agua en el suelo.

Tabla 4. 42. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 4. Contenido de agua en el suelo. Descomposición del MSEP según Ladera					
Ladera/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza o Variabilidad	Aleatorio	
Baja	Abs	2,23E-05	1,89E-05	7,70E-04	8,12E-04
	%	2,75	2,33	94,92	100
Media	Abs	3,76E-04	1,41E-04	1,71E-04	6,89E-04
	%	54,64	20,51	24,85	100
Alta	Abs	3,88E-04	1,18E-04	4,47E-04	9,52E-04
	%	40,76	12,36	46,88	100
Promedio Porcentual		32,7	11,7	55,5	

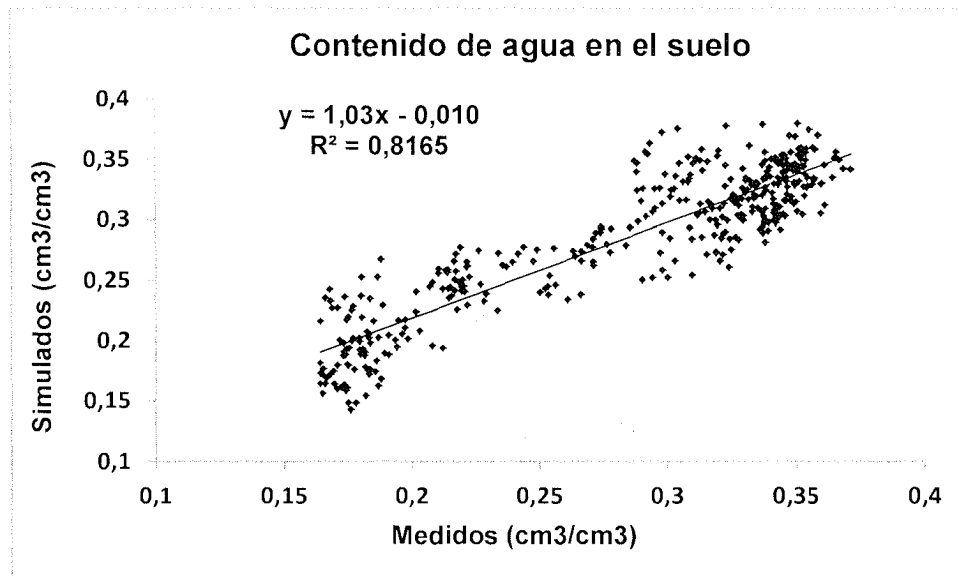


Figura 4. 37. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del contenido de agua en el suelo para el Modelo 4

En lo que se refiere al sub proceso de Drenaje mostrado en la figura 4.38 se observa en la ladera baja el ajuste es bueno durante el período inicial del experimento sin embargo luego, el modelo simula dos saltos significativos, logrando simular más de lo que en realidad debería simular, ya que como ve, normalmente en esta ladera el Drenaje es bajo y con poca variabilidad. En la ladera media en general existe un buen ajuste en todo el experimento salvo en la parte final del mismo la cual el modelo simula menos de lo que realmente presentan los datos, el ajuste fue bastante bueno, presentando en menor porcentaje del error cuadrático medio de las tres laderas, finalmente en la ladera alta se puede ver que a excepción de la parte inicial del experimento, la simulación es aceptable.

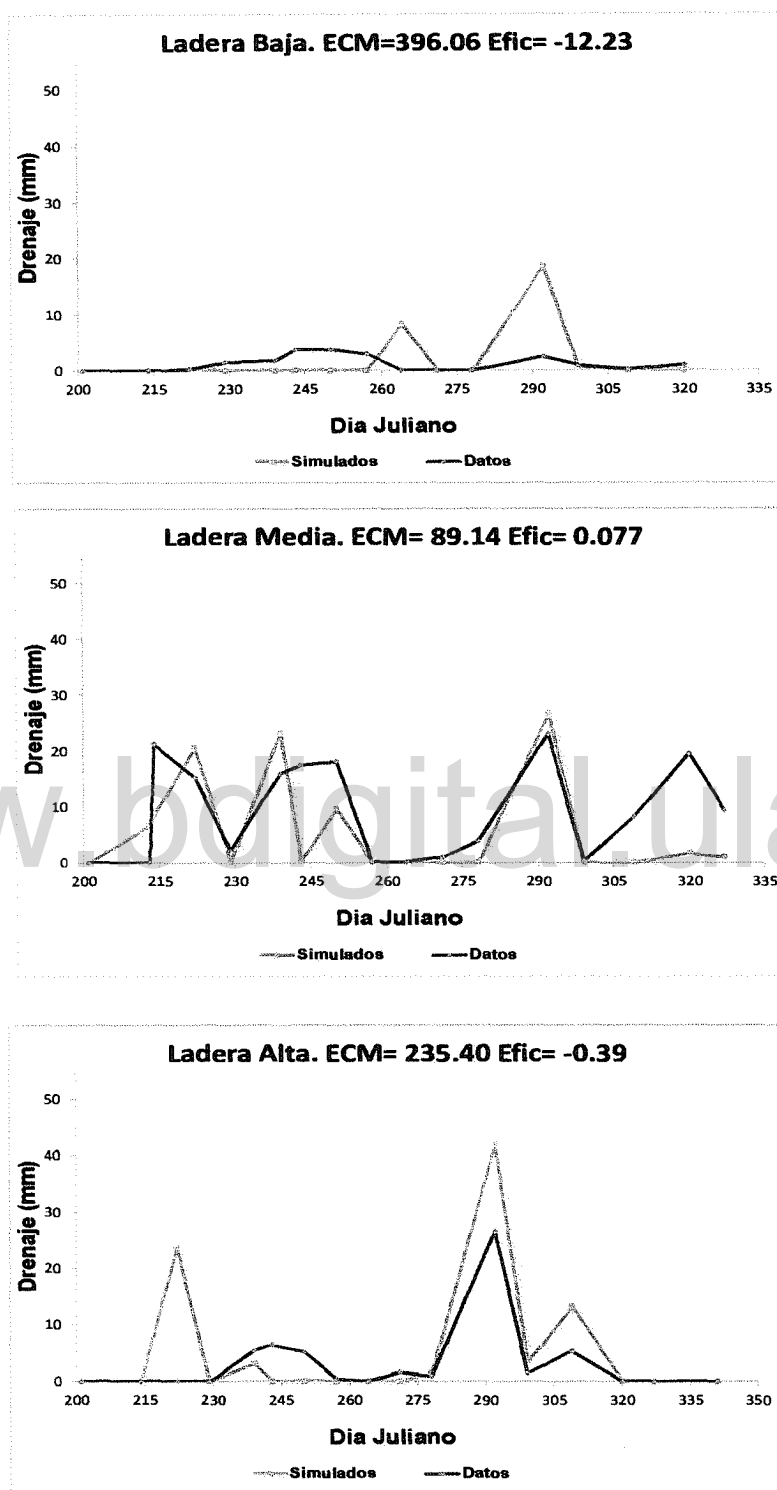


Figura 4. 38 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 4 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

Observando la descomposición del MSEP mostrado en la tabla 4.43 se observa que en el sub proceso de drenaje en este modelo planteado en el experimento de Mixteque, el mejor ajuste se obtuvo en la ladera baja, también se observa que el componente que menor margen de error obtuvo fue el componente de la diferencias de promedios, seguido por el componente aleatorio, respecto a la proporción del error en general este modelo simula bien los promedios de los valores de drenaje ya que tienen un 10,5% de la proporción del error. La recta de regresión muestra que el modelo explica el 40% de la variabilidad del drenaje.

Tabla 4. 43. Balance hídrico de Mixteque. Modelo 4. Drenaje. Descomposición del MSEP según Ladera					
Ladera/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza o Variabilidad	Aleatorio	
Baja	Abs	4,21E-01	1,38E+01	1,25E+01	2,67E+01
	%	1,58	51,71	46,71	100
Media	Abs	1,46E+01	4,89E+01	6,50E+01	1,29E+02
	%	22,48	2,20	75,32	100
Alta	Abs	4,39E+00	3,03E+01	5,88E+01	9,35E+01
	%	7,46	40,95	51,59	100
Promedio Porcentual		10,5	31,6	57,9	

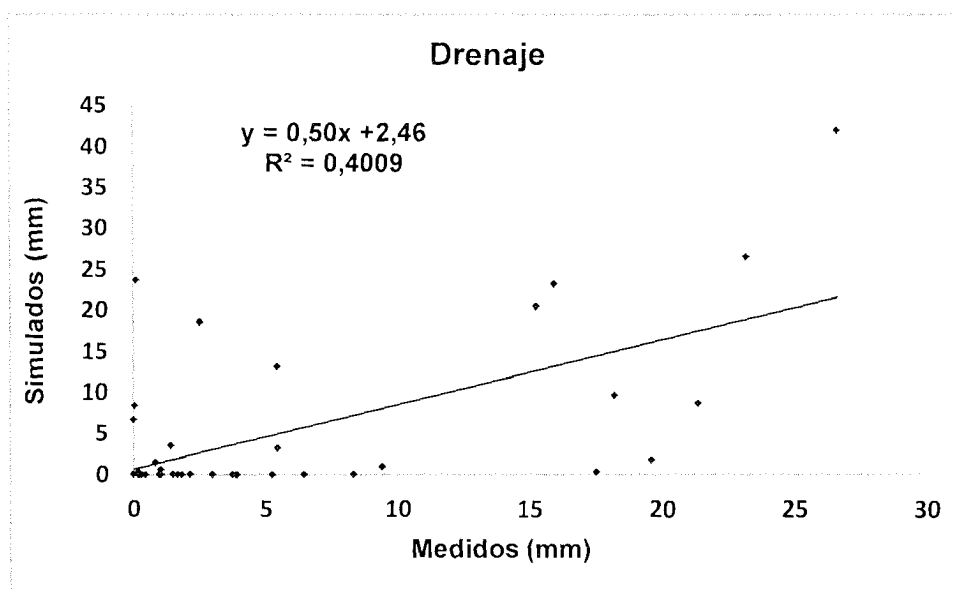


Figura 4. 39. Balance hídrico de Mixteque. Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 4

4.4.2 Balance hídrico de Gavidia

Similar al experimento de mixteque en el modelo 4, antes de mostrar los resultados de la calibración de la variable “*calibra*” que se hizo en el módulo de calibración de Vensim y cuyo resultado fue de: 1,63. Esto quiere decir que la evaporación de suelo desnudo aumenta es 1,63, lo que la hace mayor a la evaporación de suelo con cobertura vegetal.

www.bdigital.ula.ve

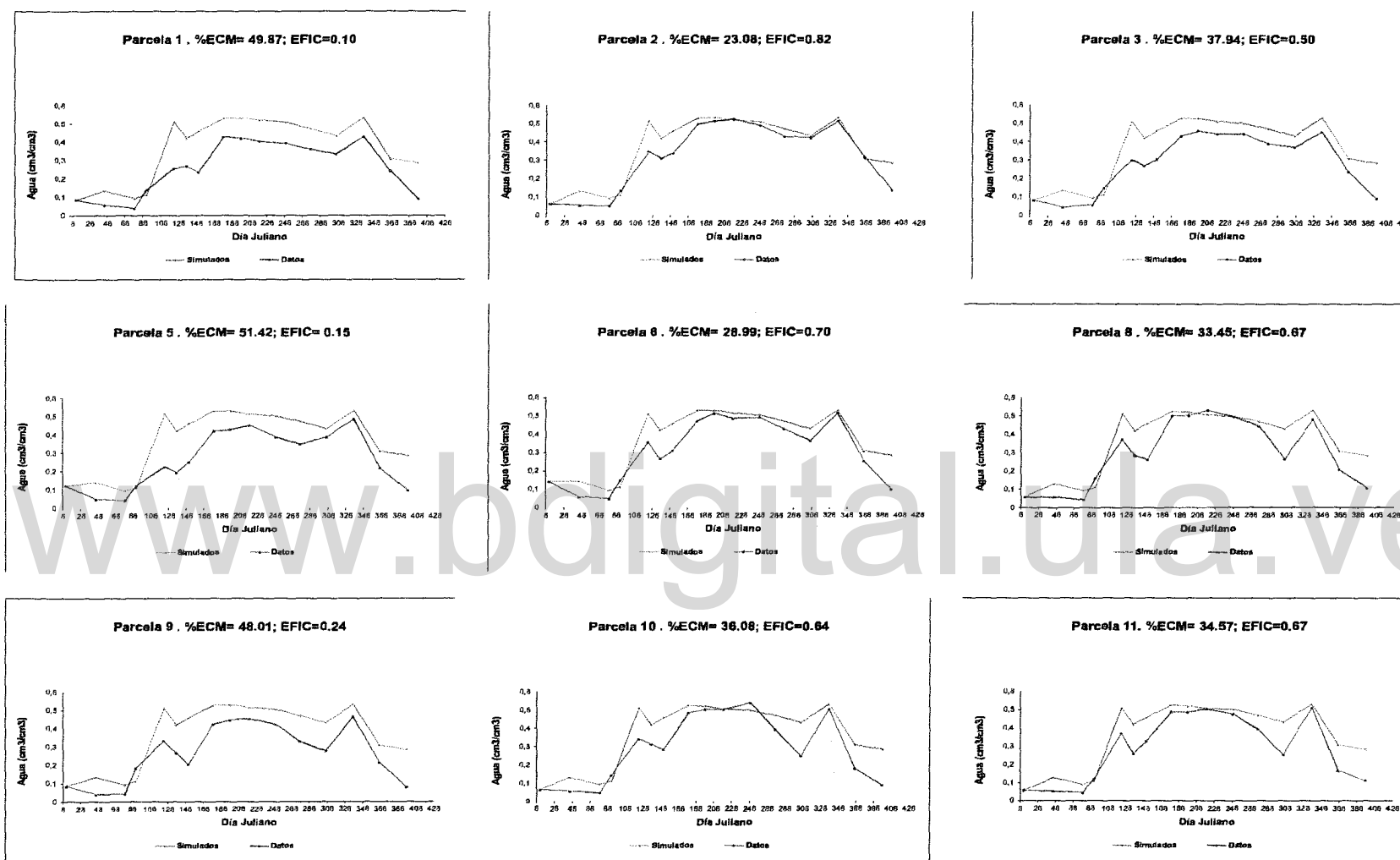


Figura 4. 40 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 4 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

Respecto al contenido de agua en el suelo, de este modelo de Balance Hídrico planteado, se observa en las Figura 4.40 de forma general que en todas las parcelas se observa que esta variable se sobreestima en casi todo el experimento, también se observa que en después de la mitad del período de tiempo el ajuste es aceptable en esta variable. En este experimento es de destacar que el índice de eficiencia varía desde 0,10 hasta 0,82.

Tabla 4. 44. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 4. Contenido de Agua en el suelo. Descomposición del MSEP según Parcelas

Parcela/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza	Aleatorio	
P1	Abs	1,19E-02	1,01E-03	3,99E-03	1,69E-02
	%	70,45	5,98	23,57	100
P2	Abs	2,26E-03	1,19E-06	3,20E-03	5,47E-03
	%	41,60	0,02	58,38	100
P3	Abs	7,35E-03	3,10E-04	3,69E-03	1,13E-02
	%	65,22	2,85	31,92	100
P5	Abs	1,17E-02	2,55E-04	6,14E-03	2,40E-02
	%	64,99	1,48	33,52	100
P6	Abs	4,09E-03	6,16E-06	3,90E-03	7,99E-03
	%	51,64	0,06	48,30	100
P8	Abs	4,34E-03	2,40E-05	5,52E-03	9,88E-03
	%	45,30	0,16	54,54	100
P9	Abs	1,05E-02	4,26E-04	5,42E-03	1,63E-02
	%	64,28	2,66	33,06	100
P10	Abs	5,19E-03	4,78E-05	5,86E-03	1,11E-02
	%	47,86	0,34	51,80	100
P11	Abs	5,74E-03	6,90E-06	4,20E-03	9,94E-03
	%	58,38	0,05	41,58	100
Promedio Porcentual		56,64	1,51	41,85	100,0

En la tabla 4.44 se muestra la descomposición del MSEP por parcelas, de acuerdo a sus tres componentes de variación del error, se puede observar que en términos absolutos, este error posee un rango comprendido entre 9,94E-03 hasta 1,11E-02. En lo que se refiere a términos porcentuales se observa que se modela bien la variabilidad, ya que este componente tiene un error del 1,51%, por otro lado, el error que se encuentra referido a las diferencias entre los valores promedios representa el 56,64% lo cual se puede considerar alto, por último el error por parte del componente aleatorio absorbe un 41,85%. La recta de regresión de la figura 4.41 muestra que la variabilidad del contenido de agua en el suelo es explicada en un 81% por este modelo planteado.

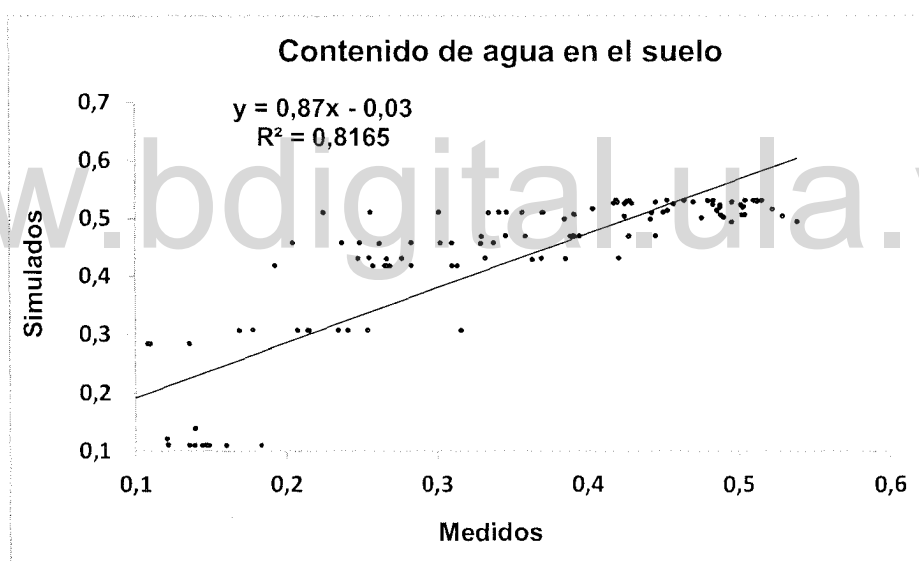


Figura 4. 41. Balance hídrico de Gavidia Recta de regresión medidos/simulados del contenido de agua en el suelo para el Modelo 4

En lo que se refiere al subproceso de Drenaje presentado en la Figura 4.43, se puede observar el índice de eficiencia en este modelo tienen un recorrido que va desde -5,90 hasta 0.86. Por otro lado, en la mayoría de las parcelas se puede apreciar que los valores promedios de las dos series difieren de forma significativa.

Observando la tabla 4.45 es de destacar que el rango del error en general abarca desde $2,40\text{E-}02$ hasta su valor máximo $3,83\text{E+}03$ lo cual es bastante amplio en términos absolutos, por otro lado, en términos porcentuales se observa que este modelo simula la variabilidad con un 28,36% del Error, adicionalmente se observa que el 34,13% del error se debe a las diferencia entre los valores promedios, lo cual se puede considerar como una diferencia significativa en ese aspecto, quedando un 37,50% del error debido al componente aleatorio. Este modelo explica el 63% de la variabilidad del drenaje con un sesgo significativo al 5%.

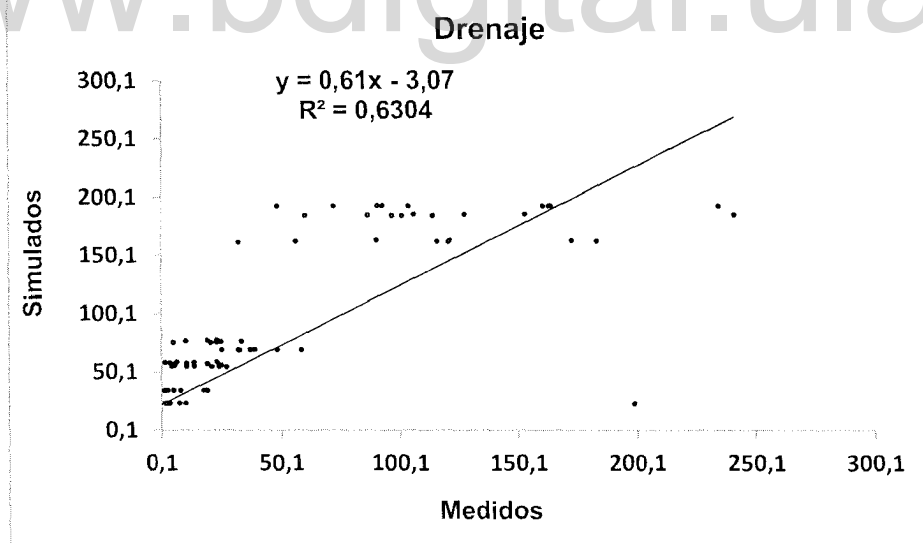


Figura 4. 42. Balance hídrico de Gavidia Recta de regresión medidos/simulados del drenaje para el Modelo 4

Tabla 4. 45. Balance hídrico de Gavidia. Modelo 4. Drenaje. Descomposición del MSEP según Parcelas					
Parcela/Comp		Errores			MSEP
		Sesgo	Varianza	Aleatorio	
P1	Abs	1,12E+03	1,89E+03	1,85E+02	3,20E+03
	%	35,08	59,13	5,79	100
P2	Abs	1,02E+03	8,62E+02	1,95E+03	3,83E+03
	%	26,66	22,48	50,87	100
P3	Abs	7,93E+02	7,09E+02	2,41E+02	1,74E+03
	%	45,48	40,69	13,83	100
P5	Abs	5,41E+01	2,02E+02	4,30E+03	2,40E-02
	%	1,19	4,43	94,39	100
P6	Abs	4,83E+02	2,28E+02	2,28E+02	9,38E+02
	%	48,42	22,83	28,75	100
P8	Abs	4,53E+02	2,77E+02	2,31E+02	9,61E+02
	%	47,09	28,85	24,05	100
P9	Abs	9,49E+02	1,16E+03	1,60E+02	2,26E+03
	%	41,90	51,01	7,09	100
P10	Abs	5,61E+02	2,60E+02	4,08E+02	1,23E+03
	%	45,68	21,13	33,19	100
P11	Abs	1,10E+02	3,31E+01	5,57E+02	7,00E+02
	%	15,69	4,72	79,58	100
Promedio Porcentual		34,13	28,36	37,50	100,0

Balance hídrico de Gavidia Drenaje. Modelo 4:

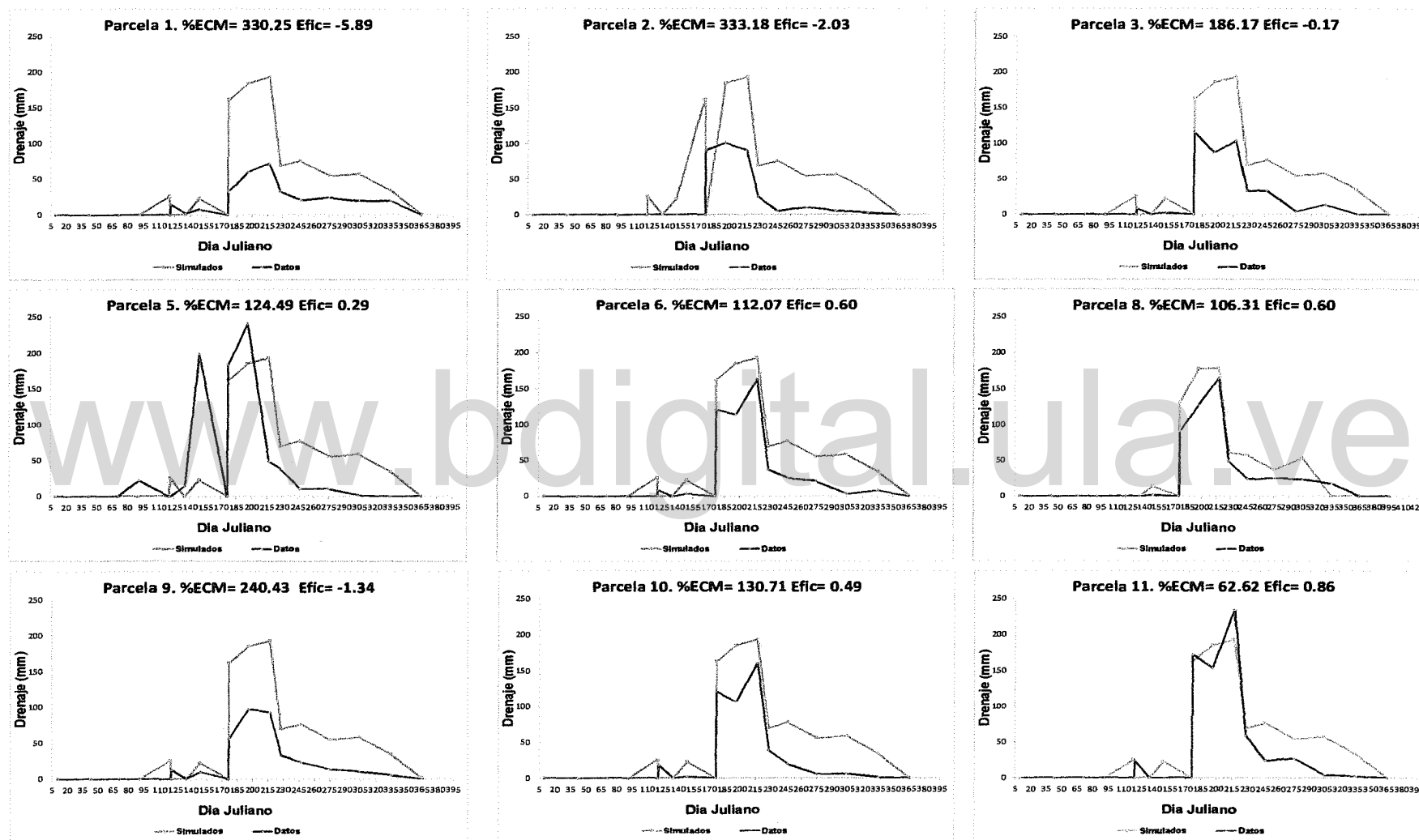


Figura 4. 43 Balance hídrico de Gavidia. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 4 según parcelas indicando el porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia

4.5 Análisis Estadístico de Verosimilitud:

El análisis de verosimilitud similar al análisis de regresión, consiste en encontrar un conjunto de parámetros que minimice la distancia entre los puntos que existen entre los datos y los valores simulados.

Para discriminar entre modelos se necesitan de herramientas para determinar estadísticamente si un modelo es mejor que el otro. En el caso especial en el que los modelos se encuentran anidados se puede usar el test de la razón de verosimilitud. Haefner (2005). A pesar de que en este proyecto no se tratan de modelos anidados, el test de la razón de verosimilitud servirá como insumo para determinar el Índice de Akaike (AIC), el cual proporcionará argumentos para escoger el mejor modelo, en función al número de parámetros utilizados, es decir, de acuerdo al grado de complejidad. El índice (AIC) será aplicado al contenido de agua en el suelo y al drenaje, cada uno de ellos en los experimentos de Mixteque y Gavidia.

Mixteque:

Contenido de Agua en el suelo:

Tabla 4. 46. Balance hídrico de Mixteque Análisis Bayesiano del Contenido de Agua en el suelo según Modelos						
Modelos	Baja	Media	Alta	Promedio Verosimilitud	Cantidad de Parámetros	AIC
1	287,85	267,2	302,06	285,70	12	-547,41
2	260,05	327,87	255,17	281,03	20	-522,06
3	273,6	324,06	247,44	281,70	21	-521,40
4	278,13	308,95	298,35	295,15	19	-552,30

En la Tabla 4.46 se muestra los valores promedios de la verosimilitud por modelo, de manera conjunta con el número de parámetros utilizados, En ese sentido se observa que el modelo 4 fue el que mejor ajuste presentó en función del número

de parámetros utilizados, ya que el índice de Akaike (AIC) en el modelo 4 es el que tiene un menor valor.

Drenaje:

Tabla 4. 47. Balance hídrico de Mixteque Análisis Bayesiano Drenaje según Modelos						
Modelos	Baja	Media	Alta	Promedio Verosimilitud	Cantidad de Parámetros	AIC
1	-46,99	-52,53	-52,67	-50,73	12	125,46
2	-51,34	-50,4	-56,82	-52,85	20	145,71
3	-49,22	-52,59	-58,17	-53,33	21	148,65
4	-42,86	-52,59	-55,3	-50,25	19	138,50

En la Tabla 4.47 se puede apreciar que en el subproceso de drenaje, el mejor modelo fue el modelo 1 al presentar el menor valor (125,46).

Gavidia:

Tabla 4. 48. Balance hídrico de Gavidia. Análisis Bayesiano Contenido de agua en el Suelo según Modelos			
Modelos	Promedio Verosimilitud	Cantidad de Parámetros	AIC
1	9,31	12	5,38
2	5,09	20	29,82
3	16,1	21	9,8
4	8,78	19	20,44

En la tabla 4.48 se observa que el mejor modelo en función al número de parámetros fue el modelo 1.

Drenaje:

Tabla 4. 49. Balance hídrico de Gavidia. Análisis Bayesiano Drenaje según Modelos			
Modelos	Promedio Verosimilitud	Cantidad de Parámetros	AIC
1	-50,48	12	150,95
2	-49,38	20	164,76
3	-8,43	21	84,87
4	-55,11	19	176,21

En este sub proceso de drenaje se observa que el modelo 3 fue el mejor modelo de acuerdo al número de parámetros utilizados.

En este capítulo se han presentados las corridas de todos los modelos propuestos en el capítulo III en lo que se refiere a tres de los subprocesos que intervienen en el balance hídrico, cada uno de estos subprocesos se han presentado de manera conjunta con las medidas de bondad de ajuste, en este caso en particular el Porcentaje del error cuadrático medio y el índice de eficiencia, de manera que se pueda obtener una medida analítica de la calidad de la simulación, más allá de la forma visual que muestran los respectivos gráficos. Adicionalmente, a través de la técnica estadística de la Verosimilitud se ha hecho un intento de discriminación de los modelos con la finalidad de poder establecer cuál de ellos ha sido el mejor, esto se hizo discriminando a través de los subprocesos de Contenido de Agua en el Suelo, Drenaje y Escorrentía

5. Capítulo V: Conclusiones

En este proyecto, se logró ensamblar cuatro modelos de balance hídrico:

- Modelo 1 Modelo base con coeficiente de cultivo único.
- Modelo 2. Modelo de balance hídrico con coeficiente de cultivo variable.
- Modelo 3. Modelo con separación de flujos de evaporación del suelo y transpiración de las plantas.
- Modelo 4. Modelo con separación de flujos de evaporación del suelo y transpiración de las plantas, ponderados por la cobertura del suelo.

Cada uno de ellos corresponde incrementalmente a una mayor complejidad en la modelización del subproceso de evapotranspiración. En todos los modelos elaborados se incluye la simulación de al menos tres flujos del balance hídrico que son: contenido de agua en el suelo, drenaje y escorrentía los cuales son evaluados comparando las salidas de la simulación con datos reales. Todos los modelos simulan adecuadamente el contenido de agua en el suelo, obteniéndose valores de r^2 por encima de 0.72 para todos los sitios considerados, sin embargo, en lo que se refiere a los flujos de drenaje y escorrentía, la comparación entre los resultados de la simulación y los valores medidos en campo no fueron satisfactorios.(ver Tabla 5.1)

Tabla 5. 1. Valores máximos y mínimos del porcentaje del error cuadrático medio e índice de eficiencia para los subprocesos de drenaje y escorrentía, en los 4 modelos de balance hídrico

Variables	%ECM		Eficiencia	
	Max	Min	Max	Min
Drenaje	702,41	29,93	0,93	-43,41
Escorrentía	334,31	56,52	0,9	-7,57

Aunque esto indica problemas potenciales en la forma en que simulamos estos subprocesos, en la práctica, en la mayoría de los casos su contribución al balance hídrico en los sitios considerados es bastante menor a la del proceso de evapotranspiración, lo dicho se puede corroborar en la tabla 5.2 la cual muestra que el subproceso de evapotranspiración representa más del 67% de las pérdidas de agua del agroecosistema, mientras que en el experimento de Gavidia, el porcentaje de salida de agua del agroecosistema por evapotranspiración es de al menos 62%, salvo en las parcelas 5 y 11 cuyos porcentaje de salida por evapotranspiración es de 44.71% y 48.26% respectivamente. Esto nos lleva a concluir que incluso tomando en cuenta estos problemas referidos a la simulación de los subprocesos de drenaje y escorrentía, los resultados arrojados por los modelos son aceptables ya que se confirma que el subproceso de evapotranspiración es el que mayor influencia tiene en el balance hídrico. Por otro lado, la evaluación relativa de la bondad del ajuste de los diferentes modelos no permite detectar mejoras significativas al incrementar la complejidad del modelo. Por esto, se recomienda el uso del primer modelo de balance hídrico (Modelo Base con coeficiente de cultivo único)

Tabla 5. 2 Experimento de Mixteque. Distribución de la entrada de agua al agroecosistema, y porcentaje de salida de acuerdo al los subprocesos de drenaje escorrentía y evapotranspiración				
		Baja	Media	Alta
Entrada de agua en el agroecosistema (mm)	Precipitación	267,71	282,03	296,36
	Riego	127	209	132
	Total	394,71	491,03	428,36
% de Salida de agua del agroecosistema	Drenaje	4,79	31,89	12,52
	Escorrentía	0,62	0,74	0,93
	Evapotranspiración	94,59	67,37	86,55

Tabla 5.3. Experimento de Gavidia. Distribución de la entrada de agua al agroecosistema, y porcentaje de salida de acuerdo al los subprocesos de drenaje escorrentía y evapotranspiración.

		p1	p2	p3	p5	p6	p8	p9	p10	p11
Entrada de agua en el agroecosistema (mm)	Precipitación	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406
	Riego									
	Total	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406
% de Salida de agua del agroecosistema	Drenaje	21,9	23,8	28,7	54,8	36	37,3	25,3	34,3	50
	Escorrentía	1,11	1,29	2,48	0,45	1,98	0,36	0,96	2,29	1,79
	Evapotranspiración	76,99	74,94	68,86	44,71	62,00	62,37	73,74	63,43	48,26

La ciencia es un proceso de aprendizaje en el cual diferentes ideas acerca de cómo funciona un aspecto del mundo se evalúan al compararlas con observaciones Hilborn y Mangel (1997). Estas ideas se expresan como hipótesis verbales en una primera instancia y luego como modelos que deben ser evaluados de acuerdo a un criterio dado que permita clasificar u ordenarlos de acuerdo a su soporte relativo con respecto a los datos.

En lo que sigue discutiremos diferentes aspectos relacionados con el análisis discriminante de los modelos.

5.1. Diferentes criterios estadísticos pueden dar respuestas diferentes

Si todos los criterios usados coincidieran, sería sencillo decidir cuál es el mejor modelo. En la práctica sin embargo, los criterios difieren. La figura 5.1 ilustra esto para el caso de Mixteque. De acuerdo al porcentaje del error cuadrático medio, todos los modelos para las diferentes laderas tienen ajustes que pueden ser considerados buenos (menores a 20%, la línea punteada que se muestra). La situación cambia cuando examinamos el índice de eficiencia. Ninguno de los modelos tiene un ajuste aceptable, encontrándose todos por debajo del umbral de 0.6 considerado como el mínimo para considerar un modelo como bueno. Por otro lado, tomando en cuenta el panel inferior de la figura 5.1 cabe destacar que las laderas baja y media presentan comportamientos similares con cada modelo

planteado, sin embargo en la ladera alta se presentan distorsiones significativas en los modelos 2 y 3, concluyendo nuevamente que para todas las laderas en mejor modelo fue el modelo 1.

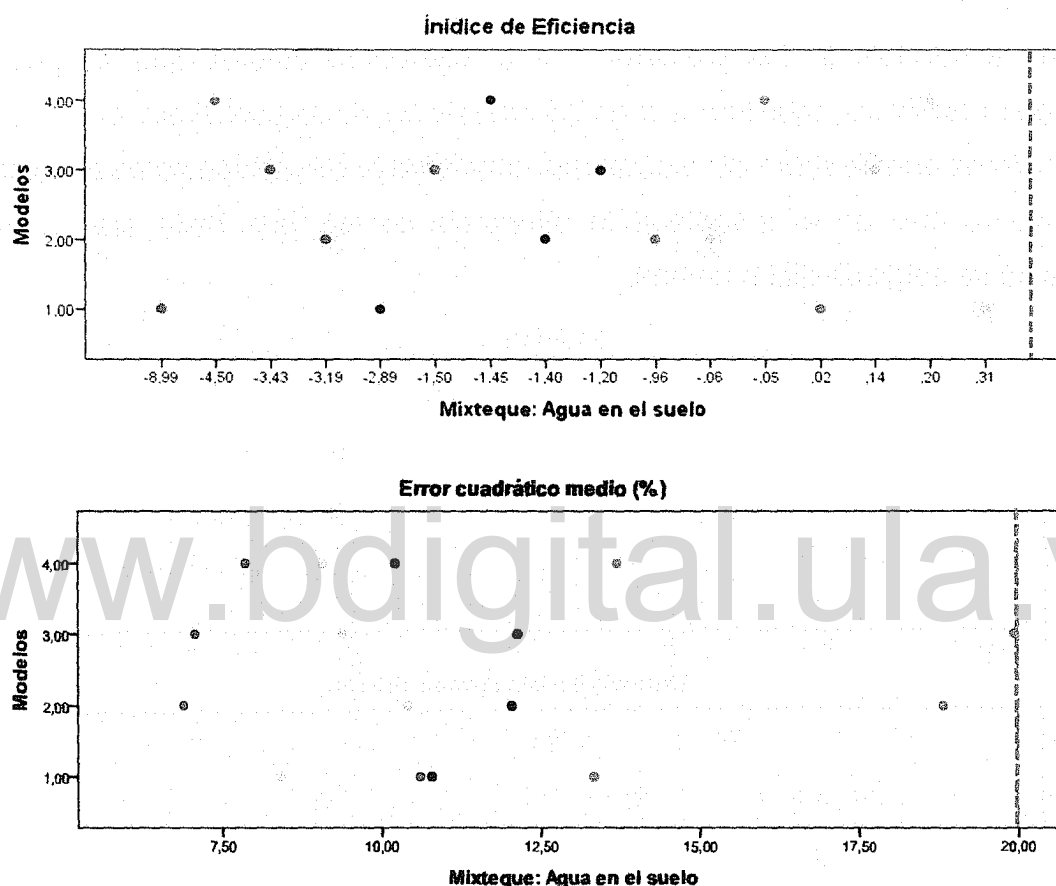


Figura 5. 1. Índice de eficiencia (panel superior) y % del error cuadrático medio (panel inferior) para los diferentes modelos en todas las laderas de Mixteque. Valores de eficiencia mayores a 0.6 y %ECM menores a 20, las líneas punteadas en los gráficos correspondientes, denotan un buen ajuste. Los puntos en negro denotan el promedio para todas las laderas.

○ Ladera Baja



Ladera Alta



Ladera Media



Promedio

Por contraste, la figura 5.2 muestra la situación diametralmente opuesta para Gavidia. El ajuste considerando el % del error cuadrático medio es de regular a malo en prácticamente todos los casos. Con respecto a la eficiencia, sin embargo, el ajuste es de bueno a excelente en muchas de las parcelas para varios de los modelos y sobrepasa el umbral de 0.6 en promedio para los modelos 1 a 3. Tomando en cuenta el índice de eficiencia presentado en el panel superior se nota que en el modelo 2, las parcelas 1 y 5, presentan valores que se pueden considerar extremos, mientras que en los modelo 3 y 4, las parcelas 1, 5 y 9 tienen unos valores que se salen del umbral que considera la simulación como aceptable, destacando que en el modelo 4 la diferencia es tal, que hace que el valor promedio se salga de dicho umbral.

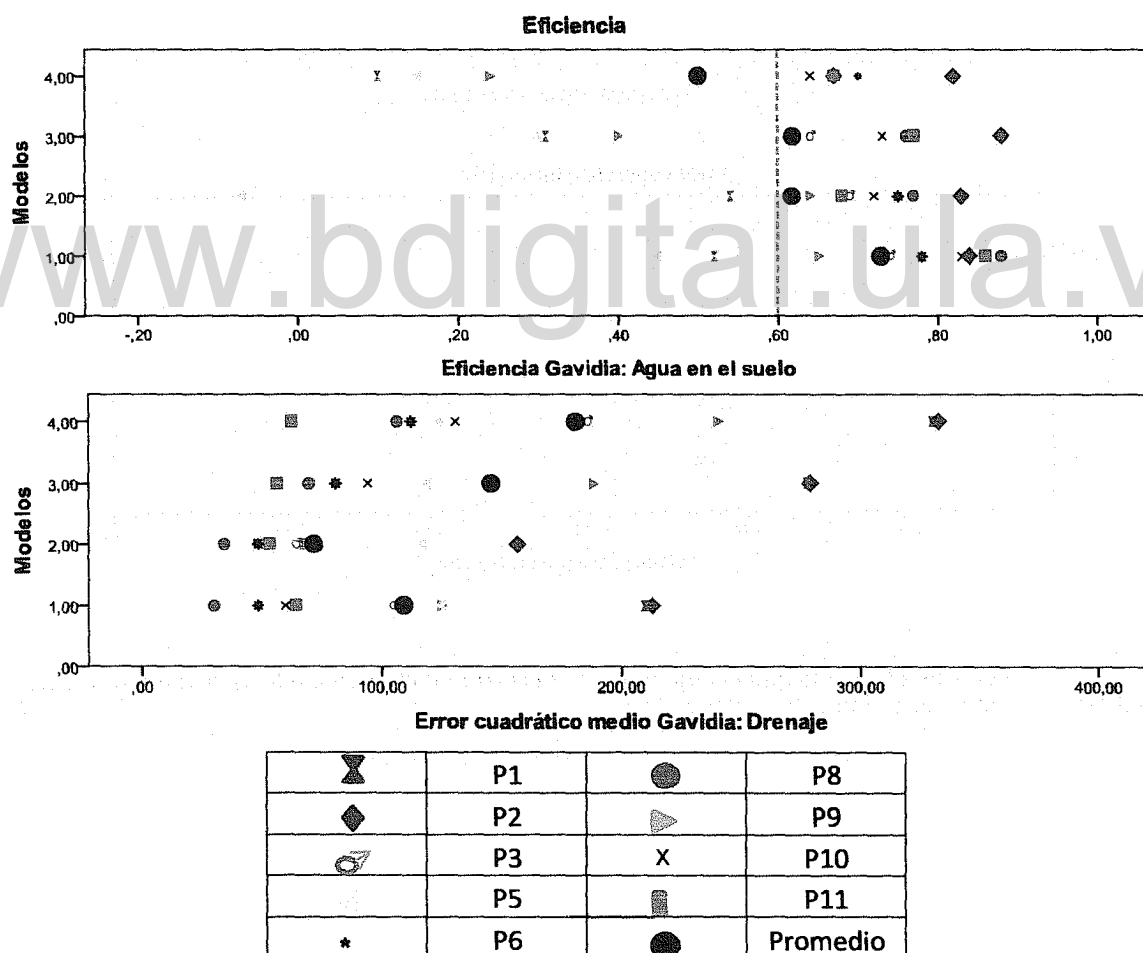


Figura 5. 2. Índice de eficiencia (panel superior) y % del error cuadrático medio (panel inferior) para los diferentes modelos en todas las parcelas de Gavidia, en el contenido de agua en el suelo. Valores de eficiencia mayores a 0.6 y %ECM menores a 20, las líneas punteadas en los gráficos correspondientes, denotan un buen ajuste. Los triángulos más grandes denotan el promedio para todas las parcelas.

Si utilizamos el promedio de los valores de los criterios y seleccionamos el modelo con el menor % del error cuadrático medio (incluso si este es muy alto para ser considerado bueno) y el mayor índice de eficiencia (incluso si este es muy bajo para ser considerado apropiado), el mejor modelo es el modelo 4 en Mixteque y el modelo 1 en Gavidia. Sin embargo, ya que las diferencias entre los valores de los criterios aplicados a los modelos en su mayoría no son muy grandes, se podría argumentar en varios casos que son prácticamente equivalentes.

Queda pendiente el asunto de porque las diferencias tan grandes entre estos dos criterios. Al examinar visualmente los resultados de la simulación y al comparar los resultados obtenidos al descomponer el error cuadrático medio, se observa que al parecer el índice de eficiencia es más sensible a desviaciones en cuanto a la variabilidad o varianza de las estimaciones. Es decir, cuando la variabilidad del modelo y de las observaciones es similar, el componente del error asociado a la variabilidad es menor y el índice de eficiencia es mayor. De hecho, la correlación de los valores del índice de eficiencia para todos los modelos y sitios con el % del error cuadrático medio que puede ser atribuido a las diferencias en variabilidad modelos-datos es de -0.71 ($p < 0.01$).

Así, una manera de seleccionar, al menos entre estos dos criterios, es pensar en si para los objetivos que se plantea el modelo es mejor concentrarse en minimizar las diferencias entre valores observados y simulados en términos del promedio o en términos de la varianza. En el primer caso el criterio a usar sería el del porcentaje error cuadrático medio. En el segundo caso, el índice de eficiencia sería el más apropiado.

En el sub proceso de drenaje mostrado en las Figura 5.3 y 5.4, vale la pena mencionar que, a pesar de que la simulación no es tan buena como para marcar los umbrales respectivos, se sigue presentando una situación similar en el sentido que el porcentaje del error cuadrático medio se encuentra bastante alejado del umbral del 20%, mientras que el índice de eficiencia muestra un resultado que es un poco mejor si se compara con el acercamiento a su umbral de 0.6. Por lo que,

utilizando el mismo criterio planteado para la selección del mejor modelo, en este subproceso el mejor modelo para Mixteque fue el modelo 4, mientras que para el experimento de Gavidia fue el 2. En el panel superior de la figura 5.4, en el modelo 2 se aprecia que existen un conjunto de parcelas con comportamiento similares, (parcelas encerradas en el cuadro rojo) lo cual se dificulta su apreciación, tales parcelas según su valor de menor a mayor son: P11, P9, P10 y P6.

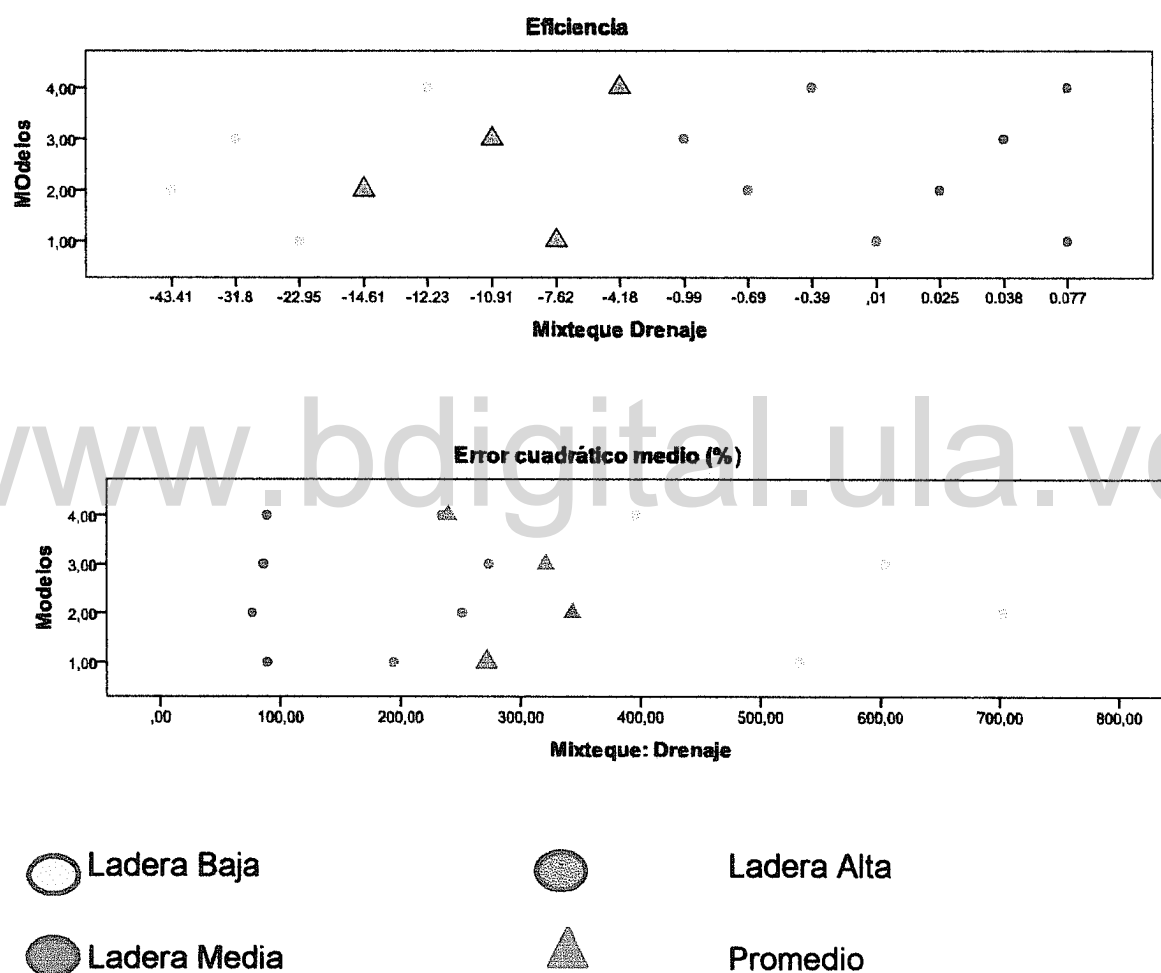
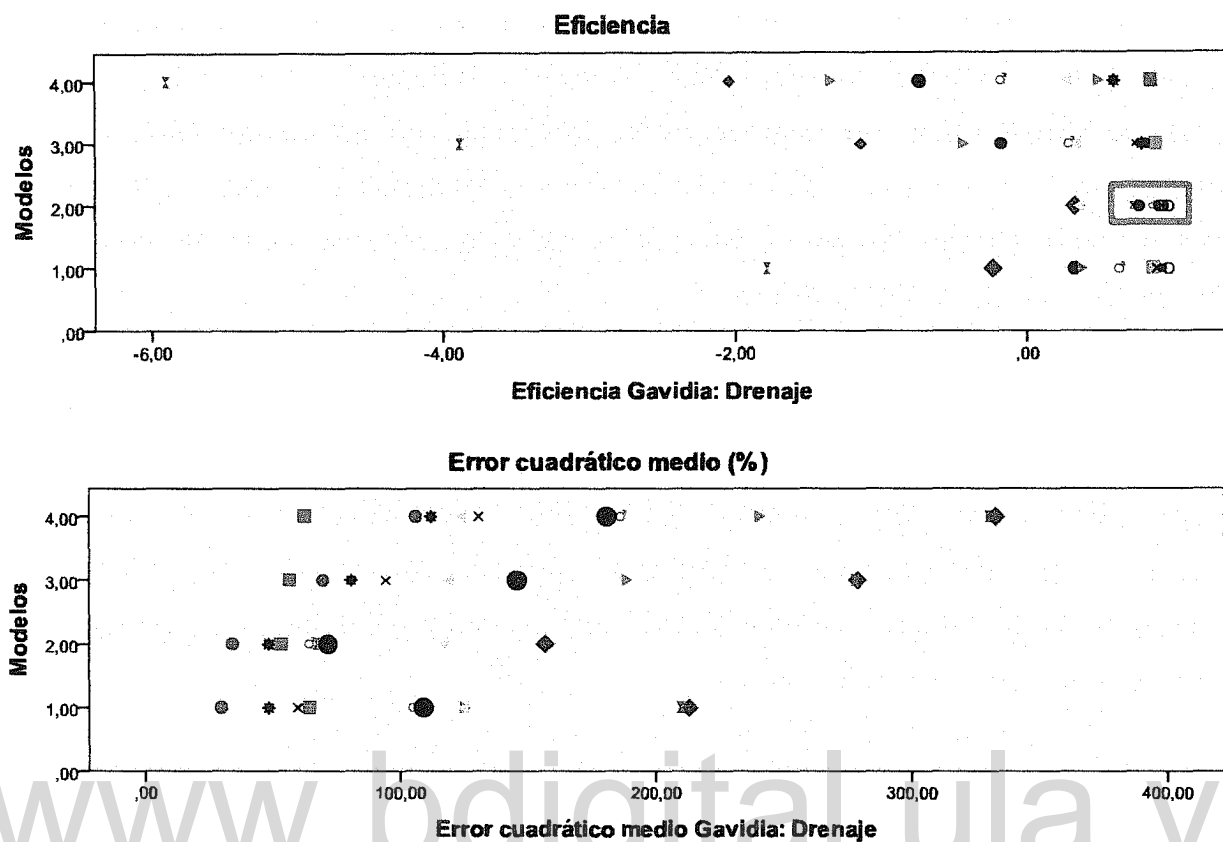


Figura 5. 3. Índice de eficiencia (panel superior) y % del error cuadrático medio (panel inferior) para los diferentes modelos en todas las laderas de Mixteque en el drenaje. Los triángulos denotan el promedio para todas las laderas



	P1		P8
	P2		P9
	P3	x	P10
	P5		P11
*	P6		Promedio

Figura 5. 4. Índice de eficiencia (panel superior) y % del error cuadrático medio (panel inferior) para los diferentes modelos en todas las parcelas de Gavidia. Los triángulos denotan el promedio para todas las parcelas

5.2. Inclusión del criterio de simplicidad: consideración del número de parámetros:

Un enfoque cándido para seleccionar el mejor modelo cuando se usan criterios como los anteriores que miden el ajuste, consiste en seleccionar el modelo que lo maximiza. En teoría, este enfoque tenderá a favorecer modelos complejos con muchos parámetros. Criterios mejores que consideren ajuste y complejidad del

modelo son preferibles pues respetan el principio de parsimonia o simplicidad (Johnson y Omland, 2004). Dos de estos criterios son la prueba de tasas de verosimilitud y el criterio de información de Akaike. Aunque en este trabajo se calculó la verosimilitud, un requisito para calcular la prueba de las tasas de verosimilitud es que los modelos considerados sean anidados, lo cual no es el caso. En este sentido, la verosimilitud sirve como un insumo para calcular el coeficiente de información de Akaike.

De acuerdo a este criterio para la variable agua en el suelo, el mejor modelo en Mixteque (tabla 4.48) resultó ser el modelo 3, aunque cabe mencionar que el modelo 2 tiene un comportamiento bastante similar, por otro lado en Gavidia fue el modelo 1 con una diferencia significativa sobre los demás modelos. En el subproceso de drenaje en Mixteque el mejor modelo fue el modelo 1 mientras que en Gavidia el mejor modelo fue el 3.

5.3. Diferentes variables pueden dar respuestas diferentes en el análisis discriminante

Una posible solución a estas diferencias es seleccionar el mejor modelo de acuerdo al proceso que más interese en un caso particular. Otra alternativa es usar una técnica multivariante que trate de determinar el mejor modelo considerando más de una variable a la vez. Un ejemplo de esta técnica es la distancia de Mahalanobis. Esta distancia tiene la propiedad que es invariante antes cambios de escala, ya que para su cálculo utiliza la inversa de la matriz de varianzas y covarianzas, otorgando de esta manera la ventaja que se puedan comparar múltiples variables, independientemente de la unidad en que se encuentren expresadas. Para su cálculo, Marcano y Fermín (2013) expresa que se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$D_i^2 = (x_i - \mu)' \Sigma^{-1} (x_i - \mu)$$

Donde:

D_i^2 : Distancia al cuadrado de Mahalanobis de los individuos u objetos.

$(x_i - \mu)'_{n \times p}$: Diferencias entre los valores del vector $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$ respecto al vector de medias $\mu = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_p)$

$\Sigma^{-1}_{p \times p}$: Inversa de la matriz de varianza y covarianza entre las p variables.

En este sentido, dicha técnica se puede aplicar en los siguientes aspectos:

- Experimento de Mixteque.
- Experimento de Gavidia.
- Consolidado (ambos experimentos juntos).

Para ilustrar la aplicación de esta técnica se estableció como criterio para la medición, las diferencias entre el valor promedio del dato y el valor promedio simulado, en las variables de contenido de agua en el suelo drenaje y esorrentía, en ese sentido la Figura 5.5 muestra la matriz resultante del cálculo cuyos elementos de la diagonal principal representan la distancia al cuadrado de Mahalanobis, según este criterio, se puede concluir que en Mixteque el mejor modelo fue el 4, pero tiene un comportamiento similar al modelo 1, por lo que si se toma en cuenta el grado de complejidad es recomendable usar el modelo 1 ya que la diferencia con el modelo 4 se puede considerar despreciable. Mientras que en el experimento de Gavidia el mejor modelo fue el 3. Tomando en cuenta todos los datos consolidados se concluye que el mejor modelo evaluado en su forma global fue el modelo 2. Otro aspecto a tomar en cuenta es que, una vez más esta técnica es susceptible a cambios en la métrica escogida para su aplicación.

Mixteque

Modelos	1	2	3	4	Dist
1	1,003	-1,03	-0,973	1	1,002
2	-1,03	3	-1	-0,97	1,732
3	-0,973	-1	3	-1,027	1,732
4	1	-0,97	-1,027	0,998	0,999

Gavidia.

Modelos	1	2	3	4	Dist.
1	2,424	-1,048	0,254	-1,63	1,557
2	-1,048	2,996	-0,896	-1,052	1,731
3	0,254	-0,896	0,27	0,372	0,519
4	-1,63	-1,052	0,372	2,311	1,52

Consolidado

Modelos	1*	2	3	4	Dist.
1	2,364	0,793	-1,115	0,365	1,538
2	0,793	0,527	0,325	1,795	0,726
3	-1,115	0,325	2,397	4,307	1,548
4	0,365	1,795	4,307	10,774	3,282

Figura 5. 5. Matriz resultante del cálculo de la distancia de Mahalanobis para el experimento de Mixteque, Gavidia y consolidado.

5.4. El mejor modelo puede depender de las condiciones del experimento

En la sección 1.1 vimos que, tomando en cuenta las consideraciones presentadas, el mejor modelo para Mixteque no es el mismo que para Gavidia. ¿Como escoger el que globalmente es mejor? Si bien el análisis detallado de cada experimento revela diferencias importantes entre ellos, un examen integrado que evalúe los modelos para todo el rango de situaciones experimentales posibles puede revelar patrones generales de comportamiento que sirvan para caracterizar globalmente su rendimiento.

5.5. Análisis integrado de los datos: un problema de escala

A continuación se muestran los resultados de realizar un análisis de regresión entre los valores medidos y simulados para las diferentes variables simuladas en el modelo considerando todos los datos disponibles.

a) Agua en el suelo:

Las regresiones de los datos medidos vs. simulados consideradas globalmente muestran valores de r^2 para todos los modelos que van desde 0.72 hasta 0.79. Las rectas de regresión ajustadas tienen como pendiente valores que van desde 0.83 hasta 0.96 con intercepto estimados menores a 0.07 en todos los casos. Es decir, que cualquiera de los modelos tiene un comportamiento aceptable. Este ajuste es un poco menor que el que se obtiene si se consideran las regresiones para los experimentos individuales. Por ejemplo, en el modelo 1 se obtuvo r^2 de 0,80 para Mixteque en Agua en el suelo y para Gavidia de 0,81. Sin embargo, cuando se consideran los datos globalmente el ajuste sigue siendo mejor, puesto que en Pansu et al. (2010) se reporta un valor de $r^2 = 0,74$ para el contenido de agua en el suelo, haciendo uso del modelo de balance hídrico de SAHEL.

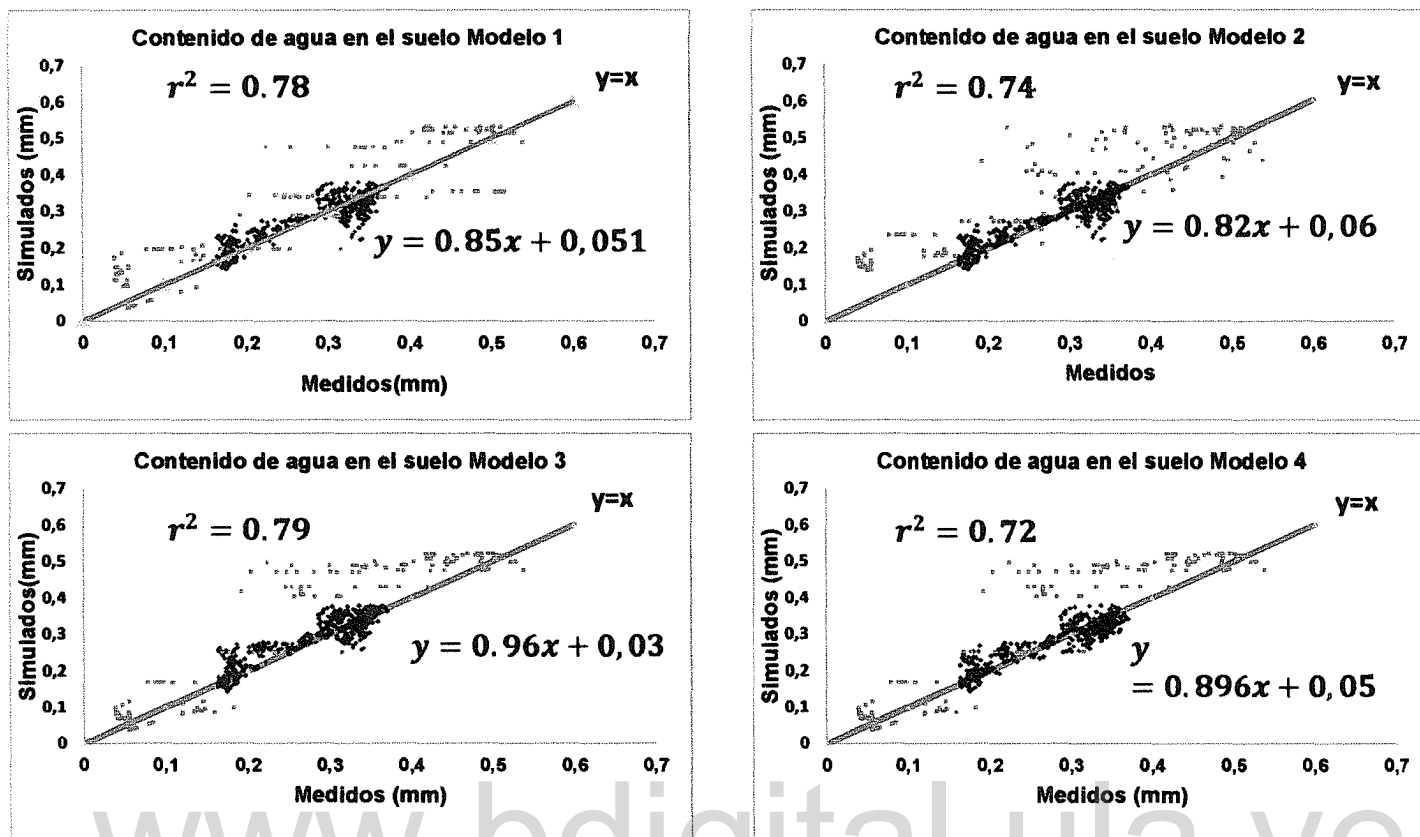


Figura 5. 6. Gráficos de regresión del contenido de agua en el suelo con los datos para los 4 modelos, con los datos consolidados de los dos experimentos. Las líneas en rojo son del experimento de Gavidia y en negro corresponden a Mixteque

b) Drenaje:

Con respecto al drenaje, los valores de r^2 van desde 0.64 hasta 0.75 pero en todos los modelos se simula más drenaje que los valores medidos en campo. Este sesgo va desde 0.28 hasta 1.4 mm en el peor de los casos. En los gráficos las pendientes van de 0,60 hasta a 0,93 y el modelo 2 se muestra considerablemente mejor.

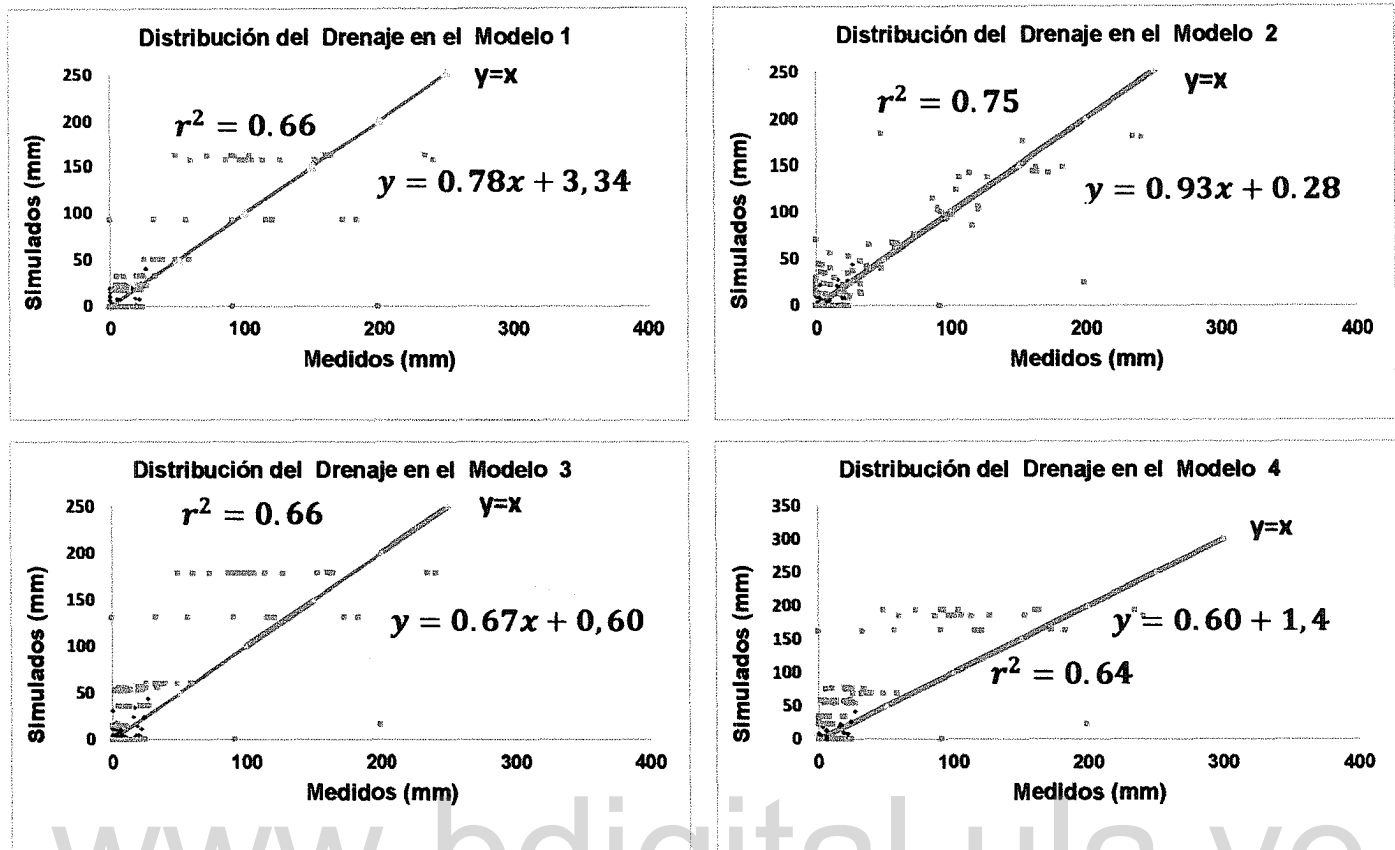


Figura 5. 7. Gráficos de regresión del drenaje con los datos para los 4 modelos, con los datos consolidados de los dos experimentos. Los puntos en rojo son del experimento de Gavidia y en negro corresponden a Mixteque

5.6. Críticas al enfoque de la FAO

En 1990 la FAO organizó una consulta de expertos e investigadores, para revisar las metodologías presentadas anteriormente que habían sido desarrolladas para el cálculo de la evapotranspiración, en esta ocasión se quería tomar en cuenta otros factores tales como el requerimiento de agua de los cultivos a través del suelo, en consecuencia se ha adoptado los diversos métodos presentado en Allen et al. (1998), para el cálculo de la evapotranspiración, pues se obtienen valores que son más consistentes, cuando son comparados con datos reales. Sin embargo en este proyecto se demuestra que siguiendo los planteamientos generales de las FAO, no se logra cambios sustanciales en las versiones sucesivas de los modelos

constituidos. El considerar coeficientes de cultivo variables en el tiempo, o el separar los procesos de transpiración y evaporación no genera un mejoramiento importante de la simulación. El enfoque de la FAO no es completamente mecanístico sino que partiendo de la ecuación de Penman-Monteith utiliza una serie de coeficientes empíricos para pasar la evapotranspiración de referencia a un valor por cultivo. Algunos de estos coeficientes empíricos no pueden ser calculados para cultivos con bajo índice de área foliar, razón por la cual en el experimento de Gavidia en la implementación del segundo modelo de balance hídrico, nos vimos en la necesidad de obtener los coeficientes del cultivo en la etapa media a través de un proceso de calibración. Por otra parte, en el manual, si bien se especifica que las pérdidas gaseosas están formadas por tres procesos: interceptación, transpiración y evaporación desde el suelo, luego se olvida el proceso de interceptación, sin embargo en la elaboración de los modelos presentados en este trabajo de investigación, el proceso de interceptación si fue tomado en cuenta en el cálculo de la evapotranspiración real.

5.7. 2.2 Algunas sugerencias para mejorar el modelo

Una limitación de toda la serie de modelos que elaboramos es que solo se considera una capa de suelo, cuando en realidad es sabido que la evaporación solo ocurre desde los primeros centímetros. El separar el suelo en más capas podría mejorar la modelización, aunque aumentaría el número de parámetros. Ya que para ello entre otros elementos es necesario establecer las ecuaciones que determinen como se distribuyen los diferentes flujos entre las distintas capas del suelo,

Otra posible alternativa para mejorar el modelo pudiera ser explorar mejoras en la modelización de otros procesos, ya que en este trabajo la modelización de los otros procesos como drenaje, escorrentía, infiltración, interceptación, es similar en todos los modelos, ya que en este trabajo de investigación se partió del supuesto de que el proceso de evapotranspiración es el más importante y el que mayor influencia tienen dentro del balance hídrico.

5.8. Calidad de los datos. Repeticiones.

Uno de los aspectos que tiene que ser tomado en cuenta a la hora de la elaboración de un experimento, es el de las réplicas, ya que permiten obtener una estimación del error experimental, y dicha estimación se convierte en la unidad básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas. En Gavidia se realizó una sola réplica por tratamiento, por lo cual puede haber una variabilidad debida a la heterogeneidad espacial de la parcela que no se considera en el análisis, en consecuencia no se puede obtener una estimación del error experimental, puesto que cuando se usa el promedio para medir los efectos de los tratamientos la varianza tiene la siguiente expresión σ^2/n y cuando $n = 1$ las diferencias observadas podrían ser resultado exclusivamente del error experimental. Por otro lado, en Mixteque, el agua en el suelo se midió utilizando TDRs, por lo que pudiera haber errores relacionados con la calibración de estos instrumentos.

5.9. Sensibilidad del modelo a parámetros de entrada medidos experimentalmente.

Otro aspecto a tomar en cuenta es la propagación del error a datos que son medidos en el campo como por ejemplo capacidad de campo o pedregosidad, y el punto de marchitez permanente, en ese sentido el análisis de sensibilidad desarrollado con detalle en el capítulo IV, se realizó variando de forma sistemática el valor medido para las tres variables mencionadas, hasta llegar a $\pm 40\%$ del valor medido, observando luego los cambios porcentuales en el porcentaje del error cuadrático medio del contenido de agua en el suelo, en ese sentido en el experimento de Mixteque se observa variación que va desde el -1,9% hasta el 16,4% del porcentaje del error cuadrático medio, mientras que en Gavidia la variabilidad va desde -9,36% hasta 13,72%, en lo que se refiere al punto de marchitez permanente en Mixteque se presenta una variación desde -7.7% hasta 19,6%, mientras que en el experimento de Gavidia desde -11,46% hasta 16,61 y por último en lo que se refiere al valor de la capacidad de campo en el

experimento de Mixteque el porcentaje del error cuadrático medio va desde -1,9% hasta 16.4% mientras que en el experimento de Gavidia va desde -31,55% hasta 58,65%. Por lo que un factor a tomar en cuenta es el error que puede existir en la medición de estos valores de campo, ya que el ajuste de los modelos se ve afectada de forma significativa por dichos valores.

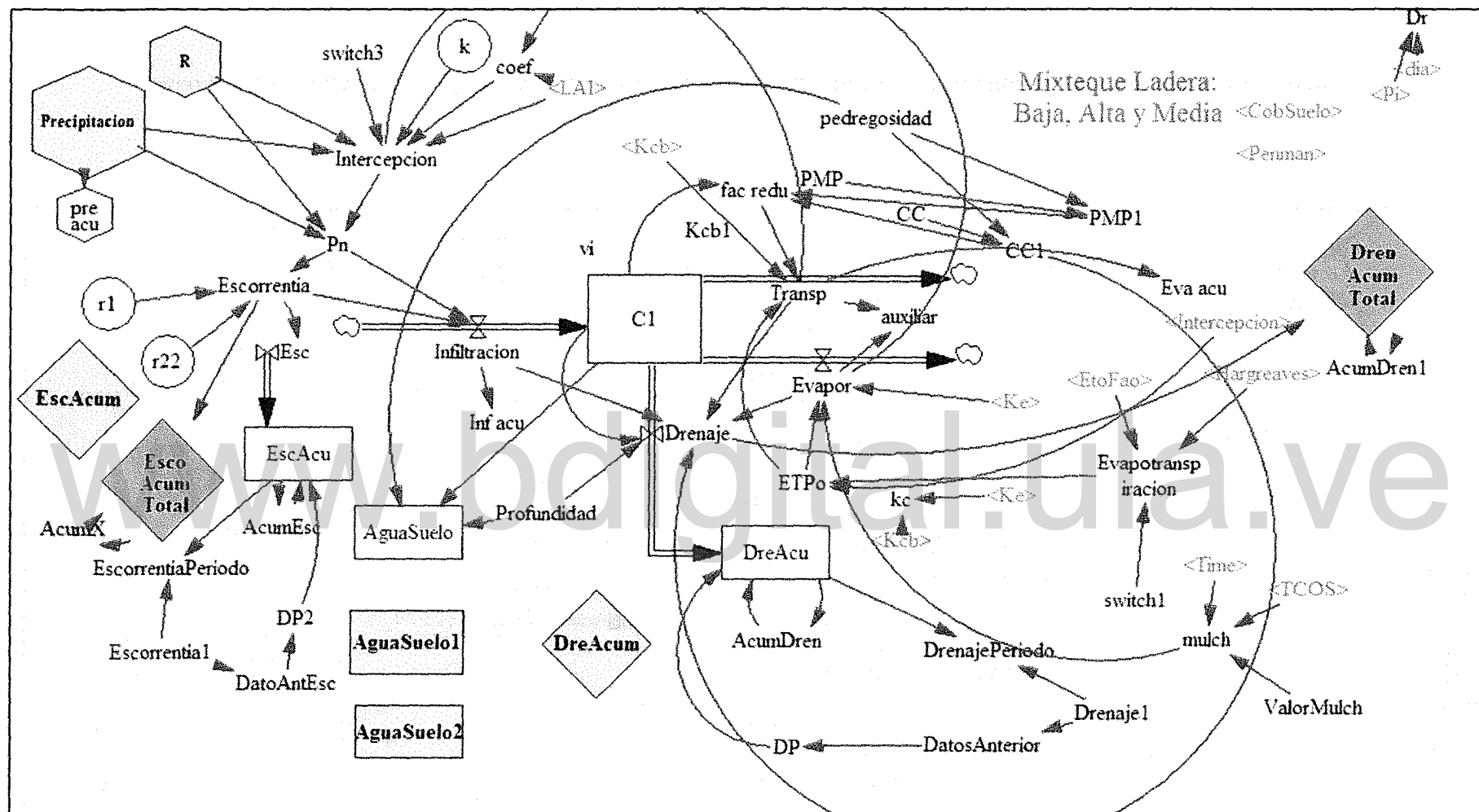
Por último es necesario acotar que, dentro de las dificultades que puede tener un trabajo de esta naturaleza, se suma una adicional, que es el grado profundo de conocimiento que debe tener el modelizador en lo que se refiere a procesos de naturaleza física, cuando su formación académica es de un área distinta, en este caso en particular estadística. En ese aspecto cabe destacar que la consolidación de este proyecto se hizo gracias al aporte de un equipo multidisciplinario en el cual se compartieron diversos puntos de vista. Destacando así, la importancia que tiene la modelización como una especie de ciencia complementaria en cualquier rama del saber.

www.bdigital.ula.ve





Anexo 2 Estructura general del modelo de balance hídrico 2 (coeficiente de cultivo variable)



Anexo 3 Estructura general del modelo de balance hídrico 3 (flujo separados de evaporación del suelo y transpiración de las plantas)



Referencias Bibliográficas:

Acevedo, D. (1988): Economía hídrica de dos agroecosistemas tropicales: una pastura permanente y un cultivo de maíz. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias. Pág 3-5.

Acevedo, M. (2004): Simulation of Ecological and Enviromental Models. Departament of Geography and Institute of Applied Science. University of North Texas. XanEdu. Pág 2.

Allen, R. Pereira, L. Raes, D. Smith, M. (1998): Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Pág 1-251.

Aracil, J. (1995): Introducción a la Dinámica de Sistemas. Isdefe, Madrid, España. Pág 56-54.

Ataroff, M., & Sánchez, L. A. (2000). Precipitación, intercepción y escorrentia en cuatro ambientes de la cuenca media del río El Valle, estado Táchira, Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, 41(1), 11-30.

Balance hídrico. (2015, 30 de enero). Wikipedia, La enciclopedia libre. Fecha de consulta, marzo 17, 2014 desde http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Balance_h%C3%ADrico&oldid=79699654.

Campbell, G. S. and Diaz, R. (1988). Simplified Soil-Water Balance Models to Predict Crop Transpiration. ICRISAT, Patancheru, India. Bidinger, F. R. and Johnson, C. (eds.).

Chereque, M. Wendor: Hidrología para Estudiantes de Ingeniería Civil. [Consulta 10/06/2011]. Disponible en: http://biblioteca.pucp.edu.pe/docs/elibros_pucp/chereque_wendor/hidrologia_estudiantes_ing_civil.pdf

Connolly, R.D. (1998): Modelling Effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: a review. Soil y Tillage. Vol 48. Pág 1-19.

Díaz, C. (2007): Balance hídrico y de nutrientes y procesos erosivos en un agroecosistema de papa bajo diferentes posiciones topográficas en los Andes Venezolanos. Postgrado en Ecología Tropical. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias.

Domingo, F. Villagarcia, L. Were, A. (2003). ¿Cómo se puede Medir y Estimar la Evapotranspiración? Estado Actual y Evolución. Ecosistemas. Revista Científica y Técnica de Ecología y medio Ambiente. [Consulta: 02/08/2011]. Disponible en: http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8959/1/ECO_12%281%29_09.pdf

DSSAT. (sf): Welcome to the Official Home of DSSAT. [Consulta: 02/08/2011]. Disponible en : <http://www.dssat.net/>

Ford, A. (1999): Modelling the enviroment. Island Press. Washington. Pág 171-181.

Gaytan, R. (2009): Estudio del Comportamiento Hidrológico del Lago de Santa Ana (Zacatecas México). Universidad Nacional Autónoma de México. Pág 27-28

Haefner, J. (2005): Modeling Biological System. Springer Science+Business Media. Pág: 144-205.

Hilborn, R. y Mangel M. (1997). The ecological detective: confronting models with data (Vol. 28). Princeton University Press.

Jacobs, A., Heusinkveld, B: (2005): Simulating of leaf wetness duration within a potato canopy. Wageningen Journal of life Sciences. Volumen 53 Pág 155.

Jamieson, P., Porter, J., Wilson, D. (1991): A test of the computer simulation model ARC-WHEAT on wheat crops grown in New Zealand. Cambridge University Press. Pág. 337-350.

Johnson, J. B., & Omland, K. S. (2004). Model selection in ecology and evolution. Trends in ecology & evolution, 19(2), 101-108.

Jorgensen, S.E. Bendoricchio, G. (2001): Fundamentals of Ecological Modelling. Elsevier Science. Pág: 78.

Klocke, N. L. Todd, R.W. Schneekloth, J.P. (1996). Soil Water Evaporation in Irrigated Corn. Applied Engineering in Agriculture. Vol 12. Pág 301-306.

Knisel, W. (1980): CREAMS: A field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. U.S. Department of Agriculture Science and Education Administration Conservation Research Report. 26 Pág: 643.

Marcano, L., & Fermín, W. (2013). Comparación de métodos de detección de datos anómalos multivariantes mediante un estudio de simulación. Saber,25(2).

Metselaar, K. (2003). Le bilan hydrique de la parcelle (modèle SAHEL).Proyecto Tropandes. Institut de Recherche pour le Développement, Natures Sciences Sociétés – Dialogues. Montpellier,France. [Consultado: 04-10-2008]. Disponible en: <http://netx.uparis10.fr/nss/atelier6.htm>.

Milera, S. Crotti, C. (2005): Implementación del modelo CROPSYS para la simulación del rendimiento del cultivo de maíz en una región de Argentina. Centro de investigación Observación y Monitoreo Territorial y Ambiental. [Consulta:12/08/2011]. Disponible en: <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo4/archivos/milera2.pdf>.

Molnar, P.(2011). Calibration Wathershed Modeling. Institute of Enviromental Engineering, Chair of Hidrology and Water Resources Magnagement, ETH Zürich. Switerland.

Pansu, M., Sarmiento, L., Rujano, M. A., Ablan, M., Acevedo, D., & Bottner, P. (2010). Modeling organic transformations by microorganisms of soils in six contrasting ecosystems: validation of the MOMOS model. Global Biogeochemical Cycles, 24(1).

Penning de Vries, F., Jansen, D., ten Berge, H., Bakema, A. (1989):Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Agricultural Systems, Volumen 36. Pág. 244.

Radiación Solar. (s.f). [Consulta: 22/03/2011]. Disponible en : http://www.solarpedia.es/index.php/Radiaci%C3%B3n_solar

Sarmiento L, Bowen W. (2002). Desarrollo de una variedad de papa andigena en los Andes venezolanos y su simulación por el modelo SUBSTOR. Ecotrópicos, 15, 109-120.

Sarmiento, L. (2000): Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. Mountain Research and Development, 20(3). Pág. 246-253.

Sarmiento, L. (1995): Restauration de la Fertilité Dans un Système Agricole a Jachère Longue des Hautes Andes du Venezuela. [PhD thesis]. Paris: Université de Paris XI.

Sentelhas, P. Gillespie, T. Santos, E. (2010): Evaluation of FAO Penman Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. Agricultural Water Management. Vol 97. Pág 635-644.

Silva, O. (2004): El modelo SWAT en una cuenca pequeña de altas pendientes: Simulación de la producción de agua. Agronomía. Trop. v.54 n.3. Pág 275-291. [Consultado 27/09/2011]. Disponible en : http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at5403/arti/silva_o.htm

Silva, O. (1995): Descripción General De Algunos Modelos De Simulación De Erosión. Revista de la Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo y del Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela. Vol 3. Pág: 30-37. [Consultado 27/05/2011]. Disponible en http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/1049/978

Sterman, J. Bussines. (2000). Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill, USA.

Vélez M., Vélez, J. 2002. Capítulo 8:Infiltración. Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Hidráulica.

Wainwright, J. Mulligan, M. (2004): Enviromental Modelling Finding Simplicity in Complexity. John Wiley & Sons, LTD. Pág 50-51.

Wallace, J. S. (2000). Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture, ecosystems & environment*, 82(1), 105-119.

Watsona, B. M., Selvalingama, S., & Ghafouria, M. (2003, July). Evaluation of SWAT for modelling the water balance of the Woody Yaloak River catchment, Victoria. In *MODSIM 2003: International Congress on Modelling and Simulation*, Jupiters Hotel and Casino, 14-17 July 2003: integrative modelling of biophysical, social and economic systems for resource management solutions: proceedings (pp. 1-6). Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc.

Wegehenkel, M: (2000): Test of a Modelling System for simulating Water Balances and Plant Growth Using Various Different Complex Approaches. *Ecological Modelling*. Vol 129. Pág 39-64

www.bdigital.ula.ve