

EVOLUCIÓN DE LA SALINIDAD EN EL CULTIVO DE CEBOLLA BAJO
RIEGO LOCALIZADO EN EL VALLE DE QUIBOR; CALIBRACIÓN Y
VALIDACIÓN DEL MODELO LEACHM PARA PREDECIR LA SALINIDAD

Por
José Grismaldo Linares Duarte.

Trabajo presentado para optar al grado de Magíster Scientae en
Recursos Hidráulicos

www.bdigital.ula.ve

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E
INVESTIGACION AMBIENTAL Y TERRITORIAL
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Mérida-Venezuela
2005

EVOLUCIÓN DE LA SALINIDAD EN EL CULTIVO DE CEBOLLA BAJO
RIEGO LOCALIZADO EN EL VALLE DE QUIBOR; CALIBRACIÓN Y
VALIDACIÓN DEL MODELO LEACHM PARA PREDECIR LA SALINIDAD

Por
José Grismaldo Linares Duarte.

Trabajo presentado para optar al grado de Magíster Scientae en
Recursos Hidráulicos

Asesor Principal:

www.bdigital.ula.ve

Ing. Agríc. M. Sc. Luis Rázuri Ramírez

Ing. Agr. M. Sc. Edgar Romero C.

Ing. Agríc. M. Sc. José G. Rosales D.

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E
INVESTIGACION AMBIENTAL Y TERRITORIAL
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Mérida-Venezuela
2005

www.bdigital.ula.ve

*..... habrá una reconstrucción de la atmósfera de la tierra a través de las energías sanadoras de los fuegos HOMA de los cuales Agnihotra es la base.
Trabajemos enérgicamente para hacer de esto una realidad...*

*Agnaye Swáhá Agnaye Idam Na Mama
Prajápataye Swáhá Prajapátaye Idam Na Mama*

Parama Dham

v

www.bdigital.ula.ve



Dedicatoria

*Dooy gracias a Dios Padre, por concederme terminar esta meta tan
anhelada y permitirme dedicarles este trabajo a las personas que
unieron su esfuerzo con el mío para lograrlo.*

*A mi padre Gonzalo, te agradezco que me hayas
enseñado a terminar lo que se comienza,
A mi madre Carmen por darme todo el cariño y amor del mundo,
A mis hermanos Gonzalo, Alberto, Jesús por darme su apoyo,
A mis hermanas Carmen, Alba y muy especialmente a
Nery, gracias por ayudarme en todo.
A mis sobrinos, para que tengan sueños y no descansen hasta hacerlo realidad.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que de una u otra manera tomaron parte en este estudio, y me apoyaron para culminar mi trabajo de grado.

A mis padres Gonzalo y Carmen, que confiaron siempre en que lo lograría, gracias por su constancia.

A mis hermanos especialmente a Carmen, Jesús, Alba y Nery que siempre me han apoyado en mis proyectos.

Al Profesor Luis Rázuri Ramírez, mi especial reconocimiento por su amistad, incondicional apoyo y acertado asesoramiento.

Al Ing° Alberto Galindo por su destreza para guiar y coordinar el trabajo en campo, sus sugerencias e ideas, muchas Gracias.

Al Ing° Edgar Romero por su apoyo a la investigación y palabras de estímulo. Al Ing° David Hernández por compartir el trabajo durante este lapso y su apoyo en campo.

Al CIDIAT y a sus Profesores, por la formación académica que me brindaron.

A la ULA-Trujillo, por permitirme realizar la escolaridad en sus instalaciones.

A Ing° Iván Valenzuela, por su gran ayuda y colaboración en el laboratorio de FUNDAGRARIA.

A la familia Galindo Sosa, Alberto, Adriana, Rafael, Andrea y el cariñoso Daniel por el gran apoyo, compartir sus espacios, sus días de familia conmigo durante la culminación de mi tesis, que Dios los proteja a donde vayan siempre y sus metas se cumplan como siempre lo han soñado, cuenten con mi amistad para siempre.

A todos mis amigos muy especialmente Maria y Deyanira Perdomo, por brindarme su apoyo incondicional.

A todos mis compañeros de estudios, muy especialmente a: Oswaldo, Jogly, Blanca, Judith y Jenny por compartir este tiempo conmigo, gracias.

INDICE

	p
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	ix
LISTA DE TABLAS.....	xv
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE SIMBOLOS.....	xxi
RESUMEN.....	xxv

Capítulos

1.	1.1 Introducción.....	1
	1.2 Objetivo General.....	2
	1.2.1 Objetivos Especificos.....	2
2.	REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....	3
	2.1 Aspectos generales del área de estudio.....	3
	2.2 Cultivo.....	3
	2.3 Suelos.....	4
	2.4 Riego localizado de alta frecuencia.....	6
	2.5 Fertirrigación.....	6
	2.6 Salinidad.....	7
	2.7 Efecto de las sales sobre las plantas.....	9
	2.8 Modelos.....	10
3.	CARACTERÍSTICAS DEL AREA EN ESTUDIO.....	13
	3.1 AREA EXPERIMENTAL.....	13
	3.1.1 Localización y características.....	13
	3.1.2 Fuente y calidad del agua para riego.....	13
	3.1.3 Suelo.....	16
	Perfil de Suelo.....	17
	Conclusiones.....	17
4.	MATERIALES Y METODOS.....	19
	4.1 CARACTERÍSTICAS EVALUADAS DE LOS SUELOS Y CLIMA.....	19
	4.1.1 Capacidad de campo.....	19
	4.1.2 Densidad aparente.....	20
	4.1.3 Salinidad del suelo.....	20
	Determinación de la salinidad mediante pasta saturada.....	21

Relación absorción de sodio (RAS).....	21
Capacidad de Intercambio Catiónico.....	22
Interpretación de los análisis de suelo.....	23
4.1.4 Fertilidad del suelo.....	23
4.1.5 Retención de humedad.....	25
4.1.6 Parámetros climáticos.....	25
4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	25
4.3 SISTEMA DE RIEGO.....	26
4.3.1 Evaluación de la cinta de goteo a distintos espaciamientos y distintas formas de preparación del terreno.....	29
4.3.2 Evaluación hidráulica de la cinta de goteo.....	31
4.4 OPERACIÓN Y MANEJO DEL RIEGO.....	32
4.4.1 Criterios para el manejo del riego de la cebolla.....	34
4.4.2 Estrategia de aplicación de agua.....	35
4.4.3 Lámina de reposición.....	38
4.4.4 Curvas de retención.....	38
4.4.5 Lámina de agua de riego.....	42
4.5 ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO.....	44
4.5.1 Preparación de tierras.....	44
Mecanización del suelo deseada.....	44
Incorporación de fertilizantes y materia orgánica.....	44
4.5.2 Semillero.....	46
4.5.3 Transplante.....	47
4.5.4 Resiembra.....	48
4.5.5 Aplicación de riegos de asiento.....	48
4.6 MONITOREO DEL CULTIVO.....	50
4.6.1 Riego del cultivo.....	50
4.6.2 Prácticas culturales.....	51
4.6.3 Control de plagas y enfermedades.....	51
4.7 SEGUIMIENTO DE DISPOSITIVOS DE MUESTREO DE SOLUCIÓN DE SUELO.....	54
4.7.1 Captadores de solución.....	54
4.7.2 Los análisis de la solución del suelo.....	54
4.8 SALINIDAD Y EQUIPOS DE MEDICIÓN EN EL CAMPO.....	55
4.8.1 Calibración de los equipos de Conductividad eléctrica en campo.....	55
4.8.2 Características del equipo.....	56
4.8.3 Medidor de resistividad a tierra.....	57
4.8.4 Metodología para el uso del equipo.....	57
4.8.5 Uso de la sonda electromagnético.....	58
4.8.6 Medición de resistividad del suelo.....	58
4.8.7 Cálculo de la conductividad eléctrica y resistividad del suelo..	59
4.8.8 Determinación de la curva de calibración.....	59
4.8.9 Aplicaciones del equipo.....	60

4.9 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE RAÍCES.....	61
4.10 MUESTREO DE TEJIDO.....	61
4.11 DINÁMICA DE SALES.....	62
4.11.1 Evaluación de la salinidad antes y después del riego en un punto.....	63
4.11.2 Evaluación periódica para observar la dinámica de sales en las etapas de crecimiento, desarrollo y maduración.....	63
4.11.3 Determinación de la salinidad en el suelo por tratamiento.....	63
4.11.4 Evaluación temporal y espacial de la salinidad.....	64
4.11.5 Medición de salinidad en el bulbo húmedo.....	64
4.11.6 Evaluación de la salinidad en surco de riego tradicional antes y después del riego.....	64
4.12 MODELO LEACHM.....	64
4.12.1 Generalidades del modelo LEACHM.....	66
4.12.2 Selección del modelo.....	66
4.12.3 Fichero de entrada.....	68
4.12.4 Estructura del modelo rutinas y subrutinas.....	68
4.12.5 Inicio del programa.....	69
4.12.6 Curvas de retención y conductividad hidráulica no saturada.....	69
4.12.7 Evapotranspiración y cultivo.....	70
4.12.8 Escorrentía.....	73
4.12.9 Transporte de solutos.....	74
Ecuaciones básicas de difusión y convección.....	77
4.12.10 Ecuaciones de convección-dispersión (EDC).....	78
4.12.11 Equilibrio químico.....	81
4.12.12 Formato de fechas.....	83
4.12.13 Fichero de salida.....	84
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	85
5.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	85
5.2 LÁMINAS Y VOLÚMENES DE RIEGO.....	88
5.3 TIEMPOS DE RIEGO.....	88
5.4 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO.....	94
5.5 FERTIRRIGACION.....	95
5.6 CARACTERIZACIÓN DE LA SALINIDAD EN EL SUELO.....	98
5.7 DINÁMICA DE SALES.....	102
5.7.1 Evaluación de la salinidad antes y después del riego en riego por goteo.....	103
5.7.2 Evaluación periódica para observar la dinámica de sales en las etapas de crecimiento, desarrollo y maduración.....	106
5.7.3 Determinación de la salinidad por tratamiento.....	106

5.7.4 Movimiento y distribución espacial y temporal de las sales en riego por goteo.....	108
5.7.5 Salinidad en el perfil del bulbo húmedo.....	110
5.7.6 Movimiento y distribución espacial y temporal de las sales en el surco en sistema de siembra tradicional.....	112
5.7.7 Distribución de la humedad en riego por goteo.....	114
5.7.8 Densidad de raíces y Conductividad Eléctrica.....	115
5.8 CAPTADORES DE SOLUCIÓN DEL SUELO.....	116
5.9 CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO.....	118
5.10 EFECTO DE LA SALINIDAD EN EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS.....	120
5.11 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....	121
5.12 COSECHA.....	126
6. 6.1 CONCLUSIONES.....	135
6.2 RECOMENDACIONES.....	137
BIBLIOGRAFIA.....	139
APENDICE.....	143
APENDICE A.....	145
APENDICE B.....	151
APENDICE C.....	155
APENDICE D.....	161
APENDICE E.....	177
APENDICE F.....	181

LISTA DE TABLAS

TABLA		P
2.1	Características de suelos salinos y alcalinos.....	8
2.2	Clasificación de los suelos afectados por sales según el Laboratorio de Salinidad de Riverside.	9
2.3	Combinación de las sales en la solución de del agua y su peligrosidad sobre los cultivos.....	9
2.4	Clasificación de modelos de acuerdo al tipo de conocimiento del usuario.	11
3.1	Análisis de agua de pozo y laguna.....	16
4.1	Humedad gravimétrica para la determinación de capacidad de campo..	19
4.2	Densidad aparente, método de excavación.....	20
4.3	Análisis de salinidad del suelo.....	24
4.4	Análisis de fertilidad del suelo.....	24
4.5	Retención de humedad a diferentes tensiones.....	25
4.6	Evaluación hidráulica de la cinta de goteo.....	33
4.7	Optimización de la curva de retención.....	41
4.8	Láminas brutas de riego.....	43
4.9	Riegos de asiento.....	49
4.10	Rendimiento del cultivo de cebolla en relación a la fertilidad.....	53
4.11	Identificación de los electrodos de la sonda electromagnética.....	57
4.12	Indicadores de fallas en el medidor de resistividad a tierra.....	57
4.13	Conexiones de los puntos de poder para realizar lecturas de resistividad.....	59
4.14	Conexiones para determinar el factor de correcciones por temperatura.	59
4.15	Especie químicas consideradas por la rutina Chem.for.....	81
5.1	Láminas, tiempo, volúmenes y caudales de riego.....	89
5.2	Contenidos de humedad gravimétrico antes del riego en (%).....	94
5.3	Extracción de nutrientes en el cultivo de la cebolla.....	98
5.4	Programa semanal de fertirrigación.....	99
5.5	Macro y microelementos aplicados.....	100
5.6	Resumen del análisis de salinidad determinado por pasta saturada.....	117
5.7	Resumen del análisis de salinidad determinado en la solución del suelo.....	117
5.8	Producción de cebolla por tratamiento.....	126
5.9	Rendimiento de la cebolla en Tn ha ⁻¹	126
5.10	Distribución porcentual de la producción de cebolla por tamaño.....	127
5.11	Inventario de la producción comercial por número de riegos/día y separación entre plantas.....	129

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE FIGURAS

Figura	P
3.1 Área de la parcela experimental.....	14
3.2 Ubicación del área de investigación en la serie de Quibor.....	15
3.3 Serie de suelos del Valle de Quibor.....	18
4.1 Prueba de capacidad de campo.....	19
4.2 Diseño experimental, plano de distribución de tratamientos.....	28
4.3 Foto del cabezal de riego.....	29
4.4 Foto de distribución del sistema.....	29
4.5 Humedecimiento a distintos espaciamento entre cintas.....	30
4.6 Elección de los sitios de evaluación.....	31
4.7 Distribución de tensiómetros en el diseño experimental.....	37
4.8 Ubicación de tensiómetros.....	38
4.9 Curvas de retención de humedad.....	40
4.10 Aplicación de fertilizantes y materia orgánica.....	45
4.11 Preparación de tierras y camas conformadas.....	46
4.12 Semillero.....	47
4.13 Planchas de siembra para garantizar la densidad de plantas y proceso de transplante.....	48
4.14 Riegos de asiento.....	50
4.15 Protección vegetal.....	52
4.16 Curva de calibración de la sonda electromagnética.....	60
4.17 Curva de calibración del medidor de resistividad de suelo.....	61
4.18 Diagrama de muestreo sobre la cama.....	63
4.19 Procesos que se toman en cuenta en el modelo LEACHM.....	67
5.1 Precipitación y Evaporación mensual, en mm, durante el ciclo del cultivo.....	85
5.2 (a) y (b) Valores climáticos diarios durante el ciclo del cultivo.....	86
5.3 Volúmenes y caudales aplicados diariamente en el riego localizado..	92
5.4 Lámina bruta aplicada diariamente y evaporación de la tina.....	92
5.5 Tiempo y lámina bruta de riego.....	93
5.6 Lecturas diarias del tensiómetro.....	93
5.7 Contenido de Humedad.....	95
5.8 Macronutrientes absorbidos por la planta.....	96
5.9 Micronutrientes absorbidos por la planta.....	97
5.10 Propiedades químicas del suelo determinadas en extracto de pasta saturada en muestra compuesta en el área en estudio.....	101
5.11 (a) Comportamiento de los cationes a profundidad de 0-15 cm en las distintas etapas del cultivo y (b) Comportamiento de los aniones a la profundidad de 0-15 cm en los distintos ciclos del cultivo.....	102

5.12	(a), (b) y (c) Distribución de las sales en el perfil del suelo, dos horas antes del riego, dos horas después del riego y 24 horas de haberse aplicado el riego.....	104
5.13	(a) (b) y (c) Contenidos de humedad gravimétrico dos horas antes del riego, dos horas después del riego y 24 horas de haberse aplicado el riego.....	105
5.14	Evaluación de la influencia de la fertilización en relación con la salinidad, por gotero.....	106
5.15	Conductividad eléctrica por tratamiento (0-5) cm.....	107
5.16	Conductividad eléctrica por tratamiento (5-10) cm.....	107
5.17	Conductividad eléctrica por tratamiento (10-15) cm.....	108
5.18	Distribución espacial de la salinidad en la parcela a la profundidad de 0-15 cm.a los 28DDT (12/05/2004).....	109
5.19	Distribución espacial de la salinidad en la parcela a la profundidad de 0-15 cm a los 121 DDT (13/08/2004).....	110
5.20	Distribución de la salinidad en el perfil transversal (a), perfil longitudinal (b), de una cama.....	111
5.21	Isolíneas de salinidad en riego tradicional en un surco (a) antes del riego 70 DDT, (b) después del riego 72 DDT, y (c) antes del próximo riego 78 DDT.....	112
5.22	Isolíneas de contenido de humedad en riego tradicional en un surco (a) antes del riego 70 DDT, (b) después del riego 72 DDT, y (c) antes del próximo riego 78 DDT.....	113
5.23	Isolíneas de salinidad en riego tradicional (a) después del riego 82 DDT, (b) antes del riego 85 DDT, y (c) después del riego 88 DDT...	113
5.24	Isolíneas de contenidos de humedad en riego tradicional (a) después del riego 82 DDT, (b) antes del riego 85 DDT, y (c) después del riego 87 DDT.....	114
5.25	Variación temporal del contenido de humedad en el suelo y conductividad eléctrica.	114
5.26	Ubicación de las sales en surco tradicional.....	115
5.27	Densidad de raíces (cm/cm ³) con respecto a la profundidad.....	116
5.28	Conductividad eléctrica por tratamiento con respecto a la profundidad.....	116
5.29	Comparación de los valores de concentración de iones determinados en extracto de pasta saturada y solución del suelo.....	118
5.30	Monitoreo de las propiedades químicas del agua de riego para distintas etapas del cultivo.	119
5.31	Comportamiento de los iones en el agua de riego en las distintas etapas del cultivo.	119
5.32	Influencia de la salinidad en relación con materia seca en el cultivo de la cebolla.	120
5.33	Influencia de la salinidad en relación al área foliar en el desarrollo del cultivo.	121

5.34	Conductividad eléctrica, estimada por el modelo LEACHM.....	122
5.35	Conductividad eléctrica medida en campo.....	122
5.36	Comportamiento del RAS estimado por modelo LEACHM.....	123
5.37	Comportamiento del RAS determinado en el muestreo del suelo.....	123
5.38	Estimaciones de potencial hídrico del suelo.....	124
5.39	Correlación de los cationes simulados con respecto a los medidos...	125
5.40	Rendimiento total por hectárea y por tratamiento.....	127
5.41	(a). Rendimiento de la cebolla por tratamiento y por tamaño, en Tn/ha y (b). Distribución porcentual de la producción de cebolla por tamaño.	128
5.42	(a). Número de bulbos y peso promedio del bulbo considerando la variable separación entre plantas, (b). Número de bulbos comerciales y peso promedio del bulbo considerando la variable riego y (c). Efectos de la variable riego sobre el tamaño de cebolla y la producción.	129
5.43	Porcentaje de cebollas defectuosas.....	131
5.44	Proceso de cosecha y medición de rendimiento.....	132
5.45	Proceso de selección de la cebolla.....	133

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Diferencial de distancia
γ	Constante de equilibrio
ψ_s	Potencial osmótica
λ	Parámetro de dispersividad
μ	Fuerza iónica
Ω	Medida de resistencia (ohm)
∂	Diferencial
π	Constante
Θ	Contenido volumétrico
Θ_s	Contenido de agua en saturación
$^{\circ}\text{C}$	Medida de temperatura
1D	Unidimensional
a y b	Constantes
Δt	Intervalo de tiempo
C	Coefficiente de escorrentía
Ca	Calcio
CC	límite superior de almacenamiento disponible de agua en el suelo, cm^3 agua/ cm^3 suelo.
CEe	Conductividad eléctrica en extracto de pasta
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
Cl	Cloro
cm	Centímetro
CN	Número de Curvas
CO_2	Dióxido de Carbono
CO_3H	Bicarbonato
CO_3	Carbonato
CU	Coefficiente de uniformidad
Cv	Coefficiente de variación
d	Día
dap	densidad aparente del suelo, gr/cm^3
DDT	Días después del transplante
dS m^{-1}	Decisiemens por metro
E	Escorrentía
Ef	eficiencia de riego del sistema.
Ep	Evaporación potencial
Etc	Evapotranspiración del cultivo
Etd	Evapotranspiración diaria
Etmax	Evapotranspiración máxima
Ep	Evaporación potencial
f	Factor de corrección de temperatura
fc	Factor del cultivo
fcb	Fracción de cobertura

ha	Hectárea
HA	humedad actual al momento de riego, cm^3 agua/ cm^3 suelo.
HCl	Ácido Clorhídrico
hi	Potencial matricial
$H_{\text{raíces}}$	Potencial efectivo de las raíces
Ia	Infiltración
J_s	Flujo total de solutos
K	Potasio
Ka	Constante de disociación de H_2CO_3
$K(\theta)$	Conductividad hidráulica
K_2O	Oxido de Potasio
Kf	Constante de estabilidad de los pares iónicos
Kg	Kilogramo
KH	Constante de Henry
Km	Kilómetro
kPa	Kilo Pascal
Ksp	Productos de solubilidad
K_w	Constante de disociación del agua
l h^{-1}	Litros por hora
m	Metro
m^3	Metros cúbicos
me l^{-1}	Miliequivalente por litro
Mg	Magnesio
MgO	Oxido de Magnesio
min	Minutos
mm	Milímetros
msnm	Metro sobre el nivel del mar
N	Nitrógeno
NO_3	Nitrato
P	Precipitación
Pe	Presión de entrada
PEAD	Polietileno de alta densidad
pH	Potencial de hidrogeno
Pr	profundidad media de mojado del estrato de suelo a ser regado dependiente de la profundidad de raíces considerada, mm.
PSI	Porcentaje de absorción de sodio
Pw	Peso húmedo
Ps	Peso seco
Q	Caudal
$q_{25\%}$	Es la media del 25% de valores más bajos de caudales registrados, de todas las medidas realizadas en campo.
q_{med}	Es la media de todos los caudales registrados en campo.
RAS	Relación de absorción de sodio
Rc	Resistencia de las raíces

RDF	Fracción total de raíces
S	Máxima retención potencial
SO ₄	Sulfato
t	Tiempo
Td	Transpiración potencial diaria
Tp	Transpiración potencial
U _i	Transpiración diaria para el nodo i
v	velocidad del agua en los poros
W	Flujo del Agua
W _i	Contenido de humedad
z	Profundidad del nodo

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

RESUMEN

La presente investigación se realizó en Valle de Quibor, municipio Jiménez del estado Lara, Venezuela. El área en estudio presenta un clima semiárido, con una precipitación que no supera los 500 mm anuales y una evaporación alrededor de 3.000 mm. En cuanto al suelo, pertenece a la serie de Quibor que representa el 40% del Valle en conjunto con la serie Chaimare; éste se clasifica como Typic Haplocambids, arcilloso fino, isohipertérmico. Fisiográficamente es una cubeta de desborde de topografía plana (0,5%) y micro relieve plano y liso. La salinidad medida por su CE es de $6,5 \text{ dSm}^{-1}$, con presencia dominante de la sal sulfatos de calcio. El agua de riego se clasifica según el Laboratorio de salinidad de Riverside en C_3S_1 , salina sin presentar posibles problemas de sodio.

El cultivo de cebolla *Allium cepa* L. se estableció en la finca “El Caujaral” regada bajo riego por goteo. Durante el ciclo vegetativo se realizaron evaluaciones de salinidad sobre las camas de siembra, para ello se utilizaron equipos de medición en campo y muestreos de suelos y agua de riego para análisis de laboratorio. Además, estas evaluaciones permitieron la calibración y validación del modelo LEACHM, el cual predice, a través del tiempo, las condiciones de salinidad en el suelo.

La evolución de la dinámica de sales se midió en periodos continuos, en las distintas etapas fenológicas del cultivo, dando como resultado que el mantener una humedad cercana a capacidad de campo minimiza la CE en la zona radicular del cultivo. Situación similar se plantea con la fertirrigación, ya que ésta tuvo poca influencia sobre los niveles de salinidad.

Se demostró que el uso de agua de baja calidad puede ser utilizada en riego localizado. Además, se comprobó que el riego por goteo para cultivos de alta densidad en el Valle de Quibor es una alternativa viable; esto depende de la destreza en la operación y manejo del sistema para el suelo y cultivo deseado.

En cuanto al cultivo, se alcanzó un 89% de bulbificación en las mayores poblaciones y un 93% en las menores densidades, de lo expuesto se puede inferir que la nutrición, la humedad en el suelo y el control fitosanitario son aprovechados mejor bajo riego localizado. Resulta conveniente decir que la producción obtenida bajo riego localizado superó en 2,5 veces a la alcanzada por los productores bajo el esquema de riego tradicional, lo que indica la factibilidad del uso de esta tecnología.

De los resultados de campo y la calibración respectiva, se concluye que el modelo LEACHM puede usarse para predecir los valores de salinidad, medidos a través de CE, RAS, entre otros; las especies químicas determinadas bajo la simulación tuvieron poca correlación. No obstante, también puede utilizarse en la estimación de los potenciales hídricos.

Palabras claves: *salinidad, calibración, bulbificación, riego localizado, modelo.*

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

Los suelos están compuestos en su estructura por elementos físicos, químicos y biológicos, los cuales por la acción del clima son meteorizados, transportados y depositados por el agua de lluvia en zonas con características de relieve plano, poca precipitación y alta demanda evaporativa. Estas condiciones facilitan la formación de suelos salinos. Los elementos meteorizados que intervienen en esta conformación son Ca, Mg, Na, K, Cl, S y C y en menor frecuencia N, B e I, Pizarro (1990). La salinización del suelo depende principalmente del material de origen, ya que existe según Ferman citado por Pizarro (1990), una secuencia de extracción de iones de sus rocas y minerales, así como una velocidad para que dichos iones sean transportados y la capacidad para acumularse en las depresiones en forma de sales, lo cual depende del coeficiente de energía de dichos iones. De esta manera los cloruros, nitratos, sulfatos y carbonatos son las sales que se forman con más facilidad, como consecuencia de la meteorización, ocurriendo lo contrario en el proceso de precipitación de sales donde por ejemplo el cloruro de sodio (NaCl) permanece más tiempo en la solución del suelo.

Las sales que permanecen por más tiempo en la solución del suelo son las que afectan el buen desarrollo de las plantas, esto se debe a que las raíces de las plantas poseen una membrana semipermeable la cual permite la entrada del agua y soluciones nutritivas por difusión, al existir una presión osmótica mayor, las plantas emplean su energía para absorber el agua aprovechable viéndose afectado el desarrollo y crecimiento de los cultivos. Bajo estas condiciones se requiere de un suministro de agua en las regiones semi-áridas de manera eficiente para satisfacer las necesidades hídricas y manejar eficientemente los problemas de salinidad de suelos. El agua puede ser entregada de distintas formas, dependiendo fundamente del clima, del cultivo y del suelo. En el Valle de Quibor predomina el riego por gravedad, y aunque en su aplicación son muy eficientes, consumen grandes volúmenes de agua por superficie comparada con el riego localizado. Mediante esta investigación se estableció el cultivo de la cebolla bajo riego localizado (cinta de goteo) en suelos salinos. Al respecto Pizarro (1975) citado por Jaramillo (2002), expone que el mejor método para el lavado de sales es fraccionando la dosis de riego en varias aplicaciones, aunado a esto se debe proveer al sistema con adecuado drenaje que reciba y exporte del lote los excedentes de lluvias y aguas.

La relación de la salinidad con los cultivos es difícil de cuantificar ya que los procesos biológicos del cultivo están relacionados con las varias etapas de desarrollo, clima, toxicidad de distintas sales. La influencia de la salinidad en el crecimiento y rendimiento de los cultivos es medido por su conductividad eléctrica; al respecto Pizarro (1990) cita a Ayers y Westcot quienes han recopilado información de varios cultivos y aplicaron la ecuación de Maas y Hoffman, para determinar la disminución del rendimiento de éstos. En particular según estos mismos autores la cebolla es bastante sensible a valores por encima de 1.7 dS m^{-1} , al respecto Jaramillo (2002), muestra en su trabajo una tabla de tolerancia de los cultivos donde la cebolla se ubica en

moderadamente tolerable a la salinidad con valores mayores a 6 dS m^{-1} , esto se debe a la afinidad que este cultivo tiene con las micorrizas, ya que éstas, a parte de ayudar a la absorción de nutrientes poco movibles en el suelo por las plantas, le dan resistencia a condiciones desfavorables de suelos con pH extremos, sequías, cambios grandes de temperatura, salinidad y presencia de elementos tóxicos (Fe, Al, Mn.) además de proteger las raíces de ataque de patógenos (Jaramillo 2002, Burbano 1989 y Sánchez 1999).

Uno de los modelos más utilizados, validados y calibrados en numerosas ocasiones es el 1D LEACHM (Hutson y Wagnet 1992) y se utiliza como herramienta de diagnóstico. Una vez obtenido los datos del perfil seleccionado, son introducidos en el fichero de entrada junto con otros datos de riego y clima. En la calibración hay que tener en cuenta todos los parámetros susceptibles de ajuste, por ejemplo los parámetros de cultivo y la escorrentía se ajustan fácilmente, pero otros parámetros deben ser optimizados mediante análisis de sensibilidad.

Para la validación del modelo se debe especificar las fechas de salida correspondiente a las fechas de monitoreo para comparálas con los datos obtenidos en el perfil; una vez calibrado y validado se pueden realizar estimaciones de varios escenarios, así como la evaluación del riesgo de salinización.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar de la salinidad en el cultivo de cebolla bajo riego localizado en el Valle de Quibor; calibrar y validar el modelo LEACHM, para predecir condiciones de salinidad.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Evaluar el comportamiento de la salinidad del suelo, en el cultivo de cebolla regada bajo riego localizado modalidad de cinta de goteo.

Calibrar equipos para la medición de conductividad eléctrica en campo, bajo las condiciones de suelo y método de riego.

Determinar la evolución y dinamismo de las sales en las distintas etapas del cultivo

Calibrar y validar el modelo de simulación de salinidad LEACHM para el cultivo de cebolla.

Medir rendimiento de producción bajo el manejo de sistema de riego por goteo

CAPITULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el valle de Quibor se han realizado diferentes estudios e investigaciones sobre diferentes tópicos en búsqueda del aprovechamiento de los recursos. De esos reportes se ha recopilado cronológicamente y por tema, algunos aspectos que se relacionan con las siguientes características: aspectos generales del área de estudio, el cultivo, el suelo, el sistema de riego empleado, fertirrigación, salinidad y sus efectos sobre las plantas y características del modelo a validar LEACHM. Todo lo anterior acompañado con un breve resumen de las conclusiones más importantes.

2.1 ASPECTOS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los factores que son responsables de la salinidad del Valle de Quibor, señalados Zinck y Suárez (1970), son la litología de la cuenca de ablación, la configuración topográfica de la depresión, las características bioclimáticas y el ambiente deposicional, y estos mismos autores concluyen que todos los suelos de la depresión están afectados por la salinidad en mayor o menor grado.

Varios autores que han realizados trabajos en la depresión de Quibor, como Brito (1997) y Fernández (1980), coinciden en que el Valle de Quibor corresponde a un Bosque seco Tropical (bs-T). El clima en el Valle de Quibor es semiárido con una precipitación anual entre 400-500 mm con promedio anuales de 450 mm y una evaporación media anual que va desde los 1700 a 3200 mm, con una temperatura media anual que oscila entre los 21°C y 28°C registrándose la mínima con un valor de 12 °C, para considerarse como una zona de régimen bimodal con picos que ocurren en los meses de abril y mayo y el otro en los meses de octubre y noviembre. Al respecto Hernández (2003), dice que el Valle de Quibor está ubicado en el estado Lara en la parte centro sur a 30 Km. de la Capital Barquisimeto, en el Municipio Juan Bautista Jiménez, sus coordenadas geográficas están comprendidas entre 09° 50' 00'' y 10° 05' 00'' de latitud Norte y 69° 30' 00'' y 69° 45' 00'' de longitud Oeste.

2.2 CULTIVO

La cebolla es originaria de Asia Central. Sus formas primitivas todavía se encuentran silvestres en Irán, Turquía, Afganistán y las montañas de Altay. Por su importancia la cebolla, es un alimento de cualidades nutritivas y gustativas. La cantidad de las sustancias nutritivas depende de las condiciones en que se cultivan las plantas, por ejemplo las plantas cultivadas en condiciones anormales de regadío son relativamente más pobres en sustancias nutritivas.

Por otro lado Shainderg y Rodríguez (1993), señalan que los suelos para la cebolla deben ser ligeros, fértiles, de buen drenaje y con pH ideales entre 6 y 8, debe tomarse en cuenta que este cultivo se debe transplantar en épocas de lluvias, pero calculando que la cosecha se presente en tiempo seco, además es un cultivo de pisos altitudinales comprendidos entre 0 y 2.800 msnm.

Expone Guzmán (1997), que la cebolla está dentro del grupo de las hortalizas y es una de las principales especies, pertenece a la familia de las Amarilidáceas, de nombre científico *Allium cepa* L., que sigue en importancia como cultivo luego del tomate en Venezuela. Es una planta constituida por hojas de forma cilíndrica, huecas y mostrando fibras longitudinales, produce un tallo floral hueco en cuyo terminal se forma la inflorescencia donde se producen las semillas que permite la reproducción vegetal. El bulbo es simple, ovalado o achatado con diámetro que varían entre 3 a 10 cm, según la especie, las plantas requieren para alcanzar buenas producciones, de climas cálidos con temperaturas ideales entre 13 a 29°C y foto períodos de 10 a 12 horas de luz.

Dentro de la botánica de la cebolla es de acotar que las raíces adventicias nacen del tallo, en la base de las vainas de las hojas. Su número aumenta paulatinamente casi hasta el fin de su período vegetativo. La muerte de una parte de las raíces empieza durante el período en que los bulbos maduran, pero solamente cuando el suelo está relativamente seco. Este mismo autor define el bulbo como el órgano donde se acumulan las sustancias nutritivas de reserva durante el primer año. Consiste en túnicas o escamas carnosas, yemas y tallo verdadero.

Doorembos y Fasson (1998) manifiesta que la cebolla es sensible a la salinidad del suelo la cual influye en la disminución de los rendimientos de acuerdo al umbral de salinidad establecido para dicha especie, es de 1.2 dS m^{-1} , lo que indica que por cada unidad de CEE arriba del umbral habrá una disminución del 16%.

2.3 SUELOS

De acuerdo a Zinck y Suárez (1970), los factores actuantes responsables de la salinidad de los suelos del Valle de Quibor son: la litología de la cuenca de ablación, la configuración topográfica de la depresión, las características bioclimáticas y el ambiente diposicional. Todos los suelos de la región están afectados por la salinidad en mayor o menor grado, desde cerca del límite de salinidad hasta fuertemente salino y salino sódico. La presencia de sales en la depresión es un hecho normal, mientras ésta sea ligera a moderada, siendo los valores altos asociados a la intervención humana.

Gásperi (1978), explica que las característica de los suelos del Valle de Quibor, es la formación una costra superficial, la cual se origina por el impacto de gota de lluvia y por el proceso alternante de humedecimiento y secado que sufren estos suelos. Se detectaron dos tipos de costra: una correspondiente a suelos vírgenes, caracterizada por altos contenidos de materia orgánica y valores bajos de densidad aparente y la otra, en suelos de uso agrícola, caracterizados por bajos contenidos de materia orgánica y valores altos de densidad aparente.

En la evaluación del contenido y calidad de las sales en riego por surcos, Fernández (1980), cita a Zinck y Suárez (1970), quienes expresan que los suelos de la depresión de Quibor han sido clasificados taxonómicamente como *Aridisoles Comborthids*, de textura fina, permeabilidad lenta de baja estabilidad estructural y ligeramente salinos. En esta evaluación se sembró cebolla y se usó agua de riego de regular calidad.

De acuerdo con Shainberg y Rodríguez (1993), la dispersividad de los suelos del Valle de Quibor, es causada por cuatro efectos:

- Composición mineralógica (Arcillas expansivas y dispersivas);
- Porcentaje de sodio intercambiable (PSI entre 5 y 10);
- Textura fina con alto contenido de limo y
- Bajo contenido de materia orgánica.

Villafañe (1995), asegura que el agua que contiene iones con predominio de calcio y bicarbonatos podría conducir a problemas de sodificación del suelo. Su explicación se basa en que en riego tradicional la evaporación directa promueve la concentración de iones en el agua estancada sobre los surcos, precipitando el calcio como carbonato y en consecuencia existe un predominio del ión sodio en el agua que infiltra.

Dentro del mismo orden de ideas, el autor cita a Blavia y Florido (1973), los cuales exponen que las características del suelo de la depresión de Quibor son profundos, de textura predominante Franco limoso las de napas de desborde y Franco arcillosa limosas y arcillo limosa en las cubetas de desborde y de decantación. En todos los casos predomina la fracción de limo y en general los valores de infiltración son muy bajos, siendo muy débil la estabilidad estructural, lo cual conforma una importante limitación en el movimiento del agua a través del suelo y por ende el manejo de la salinidad

Según Grassi (1998), la solución del suelo también denominada la fase líquida o el agua en el suelo, está constituida por sales como soluto y agua como solvente. Las sales son combinaciones de: cloruros Cl^- , sulfatos $\text{SO}_4^{=}$, bicarbonatos CO_3H^- , y a veces carbonatos $\text{CO}_3^{=}$ y nitratos NO_3^- , de calcio Ca^{++} , magnesio Mg^{++} , sodio Na^+ , y potasio, K^+ .

Los coloides del suelo particularmente la arcilla tienen cargas negativas y están rodeados por iones positivos y negativos, aunque la suma algebraica de dichas cargas debe ser igual a cero. Los cationes que neutralizan las cargas están absorbidos en exceso sobre la superficie de la partícula, de modo que cuando el agua se pone en contacto con la arcilla, dicho exceso pasa a la solución. Los cationes absorbidos no pueden ser separados de la partícula de arcilla, pero sí intercambiados por otros cationes de la solución.

2.4 RIEGO LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA

Según Pizarro (1990), el riego localizado de alta frecuencia, tanto riego por goteo como la microaspersión se define: como aquellos sistemas donde el agua se aplica de forma dirigida y localizada hacia zonas de aprovechamiento radical de los cultivos. Estos tipos de riego se caracterizan, como su nombre lo indica, por la localización, lo cual implica un humedecimiento parcial del área total bajo riego, quedando el agua en el volumen del suelo explorado por las raíces.

Khan y Gil (1998), en su trabajo de investigación plantean que la respuesta de los cultivos a la irrigación no debería verse afectada por el método de riego que se emplee, sino por el régimen de humedad que dicho método de riego imponga al cultivo en cuestión, ellos aseguran que los aspectos fundamentales que lo hacen diferente son: la capacidad para mantener casi constantes niveles muy elevados de humedad del suelo y la localización del agua en una fracción del volumen radical total.

En cuanto el manejo del agua en el suelo Calvache (1998), señala que los sistemas de riego por goteo permiten aplicar el agua justo cuando, y en las precisas cantidades en que se requiere, de manera que los cultivos no deben sufrir agobio hídrico ni falta de oxígeno por riegos excesivos, además comenta que existen dos enfoques para calendarizar el riego por goteo: uno basado en la estimación de la evapotranspiración (Etc) o pérdida del agua en el suelo y el cultivo y otro basado en la humedad del suelo.

Dentro del mismo orden de ideas, Khan y Gil (1998), señalan que el método de riego localizado no permite una verdadera lixiviación de sales hacia extractos profundos y que normalmente las sales se acumulan en la periferia del bulbo húmedo. Sin embargo, una sobre aplicación de agua permite incrementar el tamaño del bulbo, alejando las sales de las raíces.

2.5 FERTIRRIGACIÓN

Las demandas de los fertilizantes cambian a medida que los cultivos crecen; algunas de las sales que son tomadas más fácilmente por las plantas se agotan más rápido que las excluidas. Esta captación preferencial de los solutos puede conducir a una alta concentración de sales que no son tomadas por las raíces. Sin embargo, éstas serían perjudiciales para un crecimiento óptimo de las plantas. Por consiguiente, una adecuada fertirrigación es importante para aumentar los nutrientes en el suelo.

La frecuencia de aplicación de los fertilizantes depende de diversos factores como el tipo de suelo, restricciones del sistema diseñado y la longitud de la estación de siembra, entre otros. De acuerdo a Hochmuth (1992), la frecuencia de la fertirrigación no es normalmente tan crítica de lograr como es el número correcto de aplicaciones en las etapas fenológicas del cultivo.

De acuerdo a lo anterior, Gabriel, Prieto y Angueira (2003), exponen que una planificación de la fertirrigación es a menudo complicada por los cambios de las condiciones climáticas y las demandas cambiantes de los requerimientos de fertilizante de los cultivos. No obstante, la fertirrigación debería ser conducida no para alterar adversamente la dinámica de los solutos, sino que debería proveer tolerancia y concentraciones óptimas de nutrientes y sales en la rizósfera. Por antes expuesto, una precisa predicción de cuándo y cuánto fertilizante incorporar es fundamental para un buen manejo del fertirrigación. Es decir, la cantidad de fertilizante a aplicarse depende de requerimientos de las etapas fenológica del cultivo en el tiempo correcto.

En cuanto a las soluciones nutritivas, Solórzano (2003), las define como sales disueltas en agua que se aplican al suelo por medio del riego, siendo necesario conocer las propiedades de solubilidad, pH y conductividad eléctrica.

2.6 SALINIDAD

Los suelos del Valle de Quibor están afectados por concentraciones de sales, predominando las de tipo sulfato de calcio (CaSO_4) y los iones Ca^{++} y Mg^{++} . Las altas concentraciones de estos iones reducen la probabilidad de problemas de sodicidad en el suelo.

En la evaluación de la salinidad en riego por surcos realizada por Fernández (1980), realizada en la zona en estudio, concluyó que los primeros riegos producen un cambio notable en el patrón de distribución de sales y luego en los riegos sucesivos. Los procesos de acumulación de sales se desarrollaron lentamente; las escasas lluvias provocaron fuertes desplazamientos de las sales, desde el camellón hacia la masa del suelo bajo el surco.

Este mismo autor cita a Dappo y Parra (1975), quienes explican una aproximación hacia el establecimiento de normas para el estudio y cartografía de áreas afectadas por sales, señalando que el objetivo fundamental de los estudios de salinidad en el ámbito parcelario es definir los avances en extensión horizontal y vertical de los frentes de salinidad, tanto antes como después del riego, así como establecer la dinámica del movimiento de las sales.

Las características de los suelos salinos y alcalinos se pueden expresar de acuerdo a la Tabla 2.1, propuesta por Szabolcs (1980), y se destaca que la característica más importante es el efecto sobre las plantas. En los suelos salinos, la alta presión osmótica de la solución del suelo como resultado de la alta concentración de sales tiene un efecto fisiológico sobre las plantas. Para el caso de los suelos alcalinos, el efecto es sobre la estructura física y la transmisión del agua, propiedades que dificultan el crecimiento de las plantas, además de un efecto tóxico de diferentes iones, en ambos casos particularmente en condiciones de encharcamiento.

Bernstein y Gyers en el artículo publicado en *Natural Resource Institute* (1990), explican que el rendimiento de la cebolla puede ser reducido por alta salinidad, particularmente cuando estas van acompañadas de una alta evapotranspiración. Igualmente estos autores mencionan que

la cebolla al parecer tiene una capacidad de ajuste de su régimen osmótico interno para compensar por sí mismas la salinidad.

Tabla 2.1 Características de los suelos Salinos y Alcalinos

Características	Salinos	Alcalinos
Ph	Menor a 8,3	Mayor a 8,3
Química de la solución del suelo	Dominada por sulfatos y cloruros	Dominada por bicarbonatos o carbonatos
Efectos electrolíticos	Floculación	Dispersión
Efecto sobre las plantas	Alto potencial osmótico de la solución del suelo	Alcalinidad de la solución de suelos
Distribución geográfica	Asociado con las zonas áridas y semiáridas	Asociado principalmente con semiáridos y semihúmedos
Propósito para recuperar el suelo	Remover los excesos de sales a través de lavado	Bajar o neutralizar los altos pH a través de química de mejoramiento.

De acuerdo con James, citado por Casanova (1996), los suelos salinos son aquellos con una RAS menor de 15, lo cual refleja los bajos niveles de sodio. La CE del extracto mayor que 4 dS m^{-1} y el pH menor a 8.5. Los aniones SO_4^{--} y Cl^- son los que dominan y las concentraciones de HCO_3^- son pequeñas. Los cationes dominantes son el Ca^{++} y Mg^{++} con acumulaciones de sulfatos, calcio (yeso) y carbonatos de calcio en el suelo y la alta concentración de sales mantienen al suelo en estado de floculación, teniendo alta permeabilidad. Además el mismo autor señala que los suelos salinos generalmente poseen costras blancas en su superficie, aunque la ausencia de las mismas no descarta la posibilidad de la existencia de suelos salinos en el área.

Según Grasis (1998), el origen de los suelos salinos es diverso, la sal puede provenir de diversas formas como son, el material de progénesis del suelo, por inundación del mar, transporte del polvo o de agua de mar pulverizada por el viento, el riego con alto contenido de sales y el ascenso de aguas y de sales solubles por capilaridad desde un plano freático ubicado cerca de la superficie. También señala este autor, que los sistemas más usados para clasificar los suelos son el ruso y el norteamericano, de estos dos el más usado es el U.S. *Salinity Laboratory* (1954), el cual ha elaborado una tabla basada en la conductividad eléctrica del extracto a saturación del suelo (CEe), el porcentaje de sodio intercambiable PSI y el pH, esto se muestra en la Tabla siguiente:

Tabla 2.2. Clasificación de suelos afectados por sales según el Laboratorio de Salinidad de Riverside (1954)

SUELO	CEe dS/m	PSI	PH
SALINO	>4	<15	<8.5
SALINO-SODICO	>4	>15	>8.5
SODICO NO SALINO	<4	>15	8.5 a 10.0

2.7 EFECTO DE LAS SALES SOBRE LAS PLANTAS

La FAO (1953), explica que las sales menos solubles son menos peligrosas al cultivo en sus diferentes etapas de crecimiento. En la Tabla 2.3 se muestra las posibles combinaciones de las sales en la solución del suelo y su peligrosidad sobre las plantas. La primera combinación por causa de su baja solubilidad y tendencia a precipitar cuando la humedad en el suelo se reduce, produce pocos daños a las plantas, por lo tanto no contribuyen al aumento de la presión osmótica, por otra parte las sales de mayor peligrosidad se ubican en la parte inferior del cuadro de combinaciones.

Tabla 2.3 Combinación de las sales en la solución del agua y su peligrosidad sobre los cultivos.

Iones	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺
CO ₃ ⁻²	mn	Bn	Mn
SO ₄ ⁻²	bn	Mn	N
Cl ⁻	Mn	N	An

mn: menos nocivas.

bn: baja nocividad.

Mn: moderada nocividad.

N: nociva.

An: altamente nociva.

El ion bicarbonato rara vez se encuentra en el suelo por su alta solubilidad y el potasio es comúnmente más absorbido por los organismos del suelo y sujeto irreversiblemente por las arcillas, es por esta razón que la combinación de las sales que presentan no incluye estos iones.

El funcionamiento de las plantas superiores para absorber el agua del suelo es mediante el mecanismo de ósmosis. El efecto de la concentración de sales en la zona radicular reduce la capacidad para obtener el agua y nutrientes disueltos que son necesarios para el crecimiento de las plantas. Esta situación hace que la planta utilice su energía en la búsqueda de agua y mantener la diferencia osmótica, las células se siguen duplicando hasta alcanzar gran número por unidad de área foliar.

De acuerdo a Solórzano (2003), en la solución del suelo puede existir uno o varios elementos que puedan ocasionar efecto de toxicidad. Entre los iones que se encuentran disueltos en la solución de suelo que producen tal efecto están los cationes Ca, Mg, Na y los aniones Cl, SO₄, HCO₃. En el caso del K puede presentarse por lo general en bajas concentraciones y el CO₃ se considera perjudicial cuando el pH del agua de riego es mayor a 8.

2.8 MODELOS

Indican Hutson y Wagenet (1992), que el modelo LEACHM ha sido validado y calibrado numerosas veces, siendo aceptado por la comunidad científica; su aplicación ha sido mayor en el diagnóstico de la salinidad. Estos mismos autores explican que las variables necesarias para calibrar el modelo son: parámetros del perfil del suelo, datos de riego, clima, entre otros. En el modelo diseñado ellos recomienda que los ficheros de entrada se ejecuten para un periodo de tiempo determinado, obteniéndose una estimación de los contenidos de humedad y la concentración de sales a distintas profundidades.

En cuanto a la validación del modelo, Hutson y Wagenet (1992), establecen como principio especificar las fechas de salida correspondientes a las fechas de monitoreo, estableciendo de esta forma una comparación entre los datos estimados por el modelo y los datos analizados en el perfil.

Un modelo es la representación conceptualizada de un sistema. Según De Wit (1993), un sistema es una parte de la realidad que contiene elementos interrelacionados. La totalidad de las relaciones entre el sistema es conocido como la estructura del sistema; los modelos también poseen una estructura por lo tanto, un modelo es la representación simplificada de un sistema.

Feetter (1994), describe dos modelos cuantitativos, los analíticos y los numéricos. Los analíticos utilizan ecuaciones básicas que se resuelven fácilmente y precisan una mínima cantidad de datos, mientras que los modelos numéricos requieren de ecuaciones algebraicas con resolución mediante aproximaciones numéricas. **MODELO LEACHM**

De acuerdo a Roy, Parkin y Wagner (2000), el modelo determinístico LEACHM usa un tiempo invariante de parámetros modelados, para producir un solo resultado y está basado en procesos físicos de infiltración de agua, redistribución y evaporación.

Dentro del mismo orden de ideas, Hoosbeek et al. (2000), establece una clasificación de modelos según el grado de conocimiento que se tenga sobre el suelo (Tabla 2.4). Por otro lado, los datos de suelo deben ser obtenidos de forma cuantitativa de todas las variables que intervienen además de un nivel de conocimiento alto en los procesos físicos y químicos que van a producir (Hanks y Ashcroft 1980), de esta manera los modelos que se adaptan a estas exigencias son los cuantitativos mecanísticos.

Tabla 2.4. Clasificación de modelos de acuerdo al tipo de conocimiento del usuario.(Hoosbeek et al. 2000).

Modelo	Tipo de conocimiento	Usuario
K1	Cualitativos-empíricos	Usuario no experto
K2	Cualitativo-mecanísticos	Usuario experto
K3	Cuantitativo-empíricos	Especialista en técnicas del suelo
K4	Cuantitativo- mecanístico empírico	Especialista en los procesos fundamentales del suelo
K5	Cuantitativo- mecanístico	Especialista en los procesos fundamentales y particulares del suelo.

Para Hurtado y Batle Sales (2003), los modelos se dividen de acuerdo al grado de complejidad como empíricos y mecanísticos. Los modelos empíricos se basan en la descripción o análisis de variables que identifiquen el sistema, mientras que los modelos mecanísticos hacen referencia a los procesos que ocurren en el sistema.

Hurtado y Batle Sales (2003), señalan que en la calibración del modelo se tiene que tomar en cuenta todos los parámetros susceptibles de ajuste. Algunos de estos parámetros se corresponden con situaciones reales y se ajustan directamente, sin embargo otros parámetros deben ser optimizados mediante análisis de sensibilidad.

Con respecto a lo anterior Hagi-Bishow y Bonnell citado por Hurtado (2003), señalan que se puede ajustar las condiciones de entrada y seleccionar las funciones de edafotransferencia más adecuadas, validando el modelo mediante índices estadísticos, y de esta manera una vez obtenida la calibración y validación del modelo se procede al análisis de escenarios y a la evaluación del riesgo de salinización de suelo.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO 3

CARACTERÍSTICAS DEL AREA EN ESTUDIO

3.1 AREA EXPERIMENTAL

Las características desarrolladas en este capítulo se refieren a la localización del área de estudio y los recursos existentes como son, las fuentes de agua y el suelo.

3.1.1 Localización y características

El Área Experimental se encuentra ubicada en la Hacienda El Caujaral, en las coordenadas 09° 56'55" latitud norte y 69° 37'00" longitud oeste. Esta parcela fue seleccionada por el Productor debido a lo representativo de la Serie Quibor, la facilidad de acceso y la cercanía de la fuente de agua.

El terreno tiene una pendiente en el sentido sur-oeste de 0,9 % y posee vías de comunicación interna en el oeste y este.

Se realizó un levantamiento planialtimétrico del área de investigación, la cual tiene una superficie de 0,7 hectáreas; además, se incluyó la ubicación de la laguna de abastecimiento, el cabezal de riego, tuberías de distribución, accesorios, tuberías de riego, tensiómetros y la estación climática.

También se realizó el levantamiento planimétrico del área adyacente sembrada con cebolla y regada con el método superficial de canteros; adicionalmente, se levantaron los canales, la laguna y el aforador Parshall, ubicado en el canal que abastece dicha área, necesario para registrar los volúmenes de agua aplicada para riego. El área neta de esta siembra es de 2,07 ha. En la Figura 3.1, se presentan los respectivos levantamientos. Por otra parte en las Figuras 3.2 se presenta la ubicación del área de investigación en la Serie Quíbor

3.1.2 Fuente y calidad del agua para riego

El agua utilizada para el riego de la Parcela Experimental proviene de una laguna de almacenamiento, la cual es alimentada por agua bombeada desde el pozo N° 17 de la hacienda, además de agua rebombada de lagunas sedimentadoras y del agua de lluvia caída en el área.

El análisis de laboratorio del agua del pozo y de la laguna, realizado el 09/03/2004 por FundaAgraria, dio como resultado una clasificación C₃-S₁, agua de alto riesgo de salinidad y bajo contenido de sodio, según criterio del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

(USDA); con valores de pH de 7,13 y 7,58; conductividad eléctrica 0,85 y 0,84 dSm⁻¹ respectivamente. Los resultados se presentan en la Tabla 3.1.

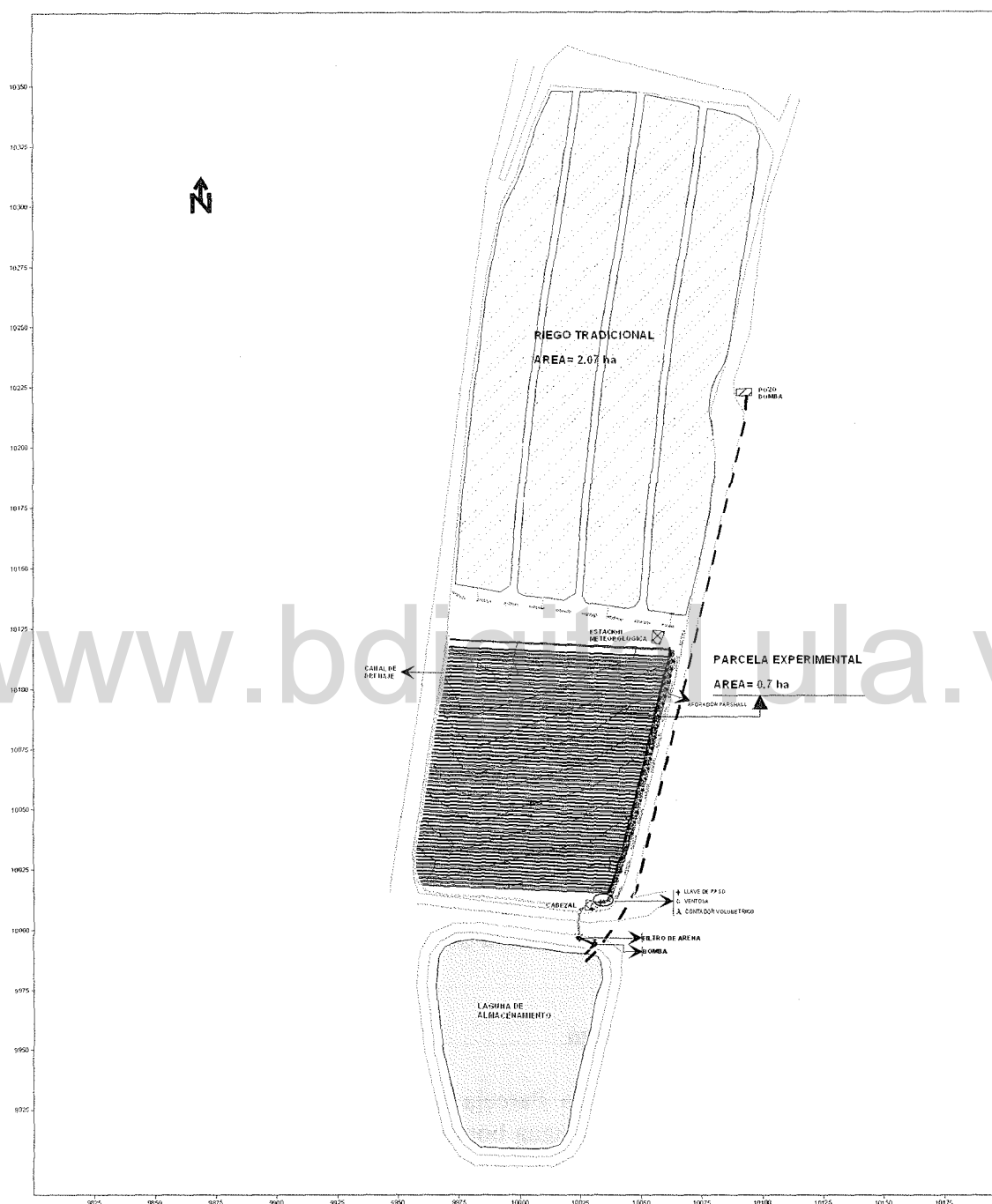


Figura 3.1 Área de la Parcela Experimental.

Análisis de agua realizados durante el tiempo de la investigación, en los laboratorios de la UCLA y MARN, corroboran que la clasificación de aguas se mantiene como C₃-S₁.

Tabla 3.1 Análisis de agua del pozo y la laguna.

LABORATORIO DE SUELOS, AGUA Y TEJIDO VEGETAL
FUNDAGRARIA

Informe Análisis de Aguas.

Estado:	LARA	Fecha:	09/03/2004
Municipio:	JIMENEZ	Agricultor:	
Localidad:	QUIBOR	Programa:	CIDAT
Finca:	EL CAJUMAL		
No. Registro	2004009		
Identificación	LAGUNA		
pH	7.56		
C. E. (dSm)	0.84		
Sodio (meq/litro)	0.0424		
Calcio (meq/litro)	15		
Magnesio (meq/litro)	15		
Potasio (meq/litro)	0.0051		
Cloruro (meq/litro)	5		
Carbonatos (meq/litro)	60		
Bicarbonatos (meq/litro)	20		
RAE	0.0112		
Clasificación	C ₃ S ₁		

COMENTARIOS: El análisis de los resultados obtenidos, según el Manual de Agricultura N° 60 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (U.S.D.A.), clasifica la muestra en la categoría C₃S₁.

Alta salinidad, no se debe usar en suelos de drenaje restringido, se requiere de medidas especiales para el control de la salinidad y de la selección de cultivos tolerantes.
Bajo Sodio, pueden ser usadas para riego en la mayoría de los suelos sin peligro de sodificarlos.

ING. AGR. EDUIGO GARCÍA FZ
LABORATORIO DE SUELOS Y AGUA

CALLE 11 CRUCE CON AV. 10. TLF. 0253-4912596 E-mail: fundagraria@cantv.net.
QUIBOR - EDO. LARA

LABORATORIO DE SUELOS, AGUA Y TEJIDO VEGETAL
FUNDAGRARIA

Informe Análisis de Aguas.

Estado:	LARA	Fecha:	09/03/2004
Municipio:	JIMENEZ	Agricultor:	
Localidad:	QUIBOR	Programa:	CIDAT
Finca:	EL CAJUMAL		
No. Registro	2004009		
Identificación	POZO		
pH	7.19		
C. E. (dSm)	0.85		
Sodio (meq/litro)	0.0262		
Calcio (meq/litro)	72.5		
Magnesio (meq/litro)	20.5		
Potasio (meq/litro)	0.0051		
Cloruro (meq/litro)	2.0		
Carbonatos (meq/litro)	0.0		
Bicarbonatos (meq/litro)	50		
RAE	0.0054		
Clasificación	C ₃ S ₁		

COMENTARIOS: El análisis de los resultados obtenidos, según el Manual de Agricultura N° 60 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (U.S.D.A.), clasifica la muestra en la categoría C₃S₁.

Alta salinidad, no se debe usar en suelos de drenaje restringido, se requiere de medidas especiales para el control de la salinidad y de la selección de cultivos tolerantes.
Bajo Sodio, pueden ser usadas para riego en la mayoría de los suelos sin peligro de sodificarlos.

ING. AGR. EDUIGO GARCÍA FZ
LABORATORIO DE SUELOS Y AGUA

CALLE 11 CRUCE CON AV. 10. TLF. 0253-4912596 E-mail: fundagraria@cantv.net.
QUIBOR - EDO. LARA

3.1.3 Suelo

El Estudio Semidetallado de Suelos a Nivel de Series del Valle de Quíbor, elaborado por el SHYQ-CA (1995), ubica el área de estudio dentro de la Serie Quíbor, como se muestra en la figura 3.3. En razón de corroborar y aclarar posibles dudas de presentarse en una inclusión, se realizó la descripción de una calicata por la Ing. Aydeé Cataño de Gómez, funcionaria del MARN, obteniendo los siguientes resultados:

Geomorfología: Depresión marginal; Material Parental: Aluvial; Relieve: plano; Microrelieve: plano (Mecánica); Pendiente general: 0-1%; Pendiente Local: 0%; Clase: Plano (Alterada por mecanización); Drenaje Externo: moderado a lento; Drenaje Interno: Moderado a Lento; Clase de Drenaje: Moderado a lentamente drenado; Roccosidad: No se observa; Pedregosidad Superficial: No se observa; Erosión: no se observa; Clasificación por capacidad de uso: IISC.

Observación: El perfil del suelo presenta a los 61 cm, una transición muy evidente que divide en dos partes el perfil del suelo, como si la parte superior fuese removida o añadida y no se corresponde con la parte inferior, asumiendo que puede haber sido removida en su parte original.

- *Perfil de Suelo*

0-38 cm AP	Textura franco arcillo limosa, color gris claro en húmedo, 10YR4/3, estructura de moderada a débil desarrollo, blocosa subangular fina y media, consistencia en húmedo firme, en mojado adhesiva y plástica, pocas raíces finas, poca actividad biológica, poros muy finos y pocos, límite claro y plano, reacción violenta al HCl.
38-52cm AB	Textura franco limoso, color gris amarillento en húmedo 10YR5/3, estructura blocosa media fuerte, consistencia en húmedo muy firme, en mojado muy adhesivo y muy plástica, presencia de conexiones de calcio pocas y definida, abundante poros finos y pocas raíces finas y media, poca actividad biológica, límite claro y plano, reacción violenta al HCl.
52cm-61 cm BN	Textura arcillo limosa, color gris amarillento en húmedo 10YR5/2, estructura blocosa media fuerte, consistencia en húmedo muy firme, en mojado muy adhesiva y muy plástica, presencia concreciones de calcio pocos y definidos, muy poca actividad biológica, pocos poros finos y no se observa presencia de raíces, reacción muy violenta al HCl, límite claro y plano.
61-115cm BC	Textura arcillo limosa, color gris amarillento en húmedo 10YR5/2, estructura masiva con algunos bloques finos subangulares débiles, subsistencia en húmedo, muy fine en mojado, muy adhesiva y muy plástica, se observa actividad biológica muy poca, presencia de pocos poros finos, límite abrupto y plano, reacción violenta al HCl.

- *Conclusiones*

- El perfil se corresponde con la serie Quibor, presenta una discontinuidad litológica a los 61 cm, su drenaje es lento interno y externo, y por lo tanto para raíces mayores a esta profundidad presenta serias limitaciones, para su humedecimiento.
- El laboreo de este suelo, debe ser moderado, para tratar de mantener la estabilidad estructural de los horizontes superiores, es importante la adición de materia orgánica y de cobertura que impida su calentamiento y actúen para controlar la salinización que existe.

Section 6



Figura 3.3. Series de suelos del Valle de Quibor.

CAPITULO 4

MATERIALES Y METODOS

4.1 CARACTERÍSTICAS EVALUADAS DE LOS SUELOS Y CLIMA

4.1.1 Capacidad de campo

La capacidad de campo se determinó utilizando un cajón de madera de forma rectangular con dimensiones de 1 m x 1 m x 0,45 m, enterrándose 5 cm en el suelo. Una vez instalado se procedió a llenarlo con aproximadamente 250 litros de agua y se tapó la superficie con un plástico con la finalidad de evitar evaporación desde la superficie libre de agua, como se observa en la Figura 4.1

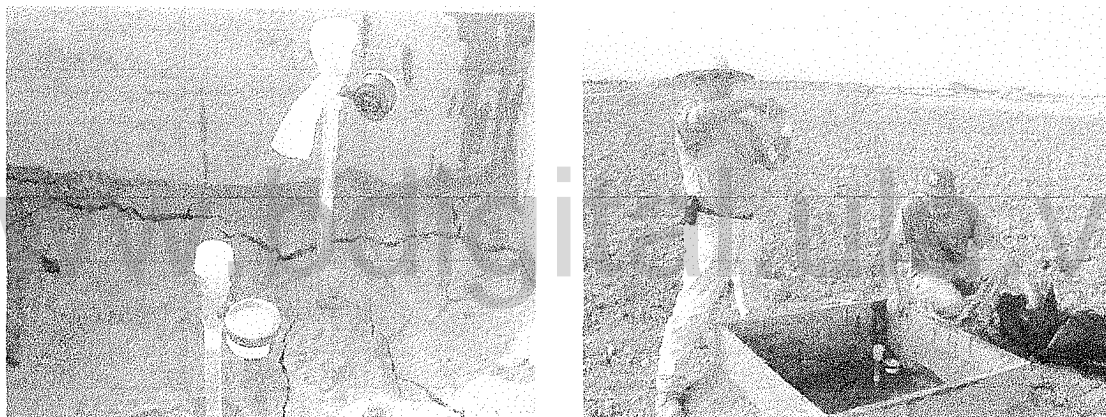


Figura 4.1 Prueba de capacidad de campo.

En el transcurso de la prueba se procedió a tomar muestras de suelo en los estratos de 0 a 15 cm y de 15 a 30 cm, profundidades a las cuales se determinaron las humedades gravimétricas a las 24, 48, 72, 96 y 120 horas para poder obtener el valor de la humedad a capacidad de campo. Dicha prueba tuvo tres repeticiones para tener una mayor confiabilidad de los datos a adoptar, los resultados se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Humedad gravimétrica para la determinación de capacidad de campo.

Prof. / horas	24	48	72	96
0-15 cm	27,3	37,5	28,6	22,2
15-30 cm	23,3	20,1	25,4	18,7

Los valores de capacidad de campo adoptados son los siguientes: estrato de 0 a 15 cm, 37,6% en base a peso y 25,6 % para el estrato 15 a 30 cm.

4.1.2 Densidad aparente

La determinación de la densidad aparente en campo, se realizó mediante el método de la excavación. Este método consistió en extraer un volumen de suelo determinado, que estuvo entre 4.655 cm^3 y 6.674 cm^3 , a los cuales se le determinó el peso seco. Se realizaron dos (2) repeticiones con 4 muestras la primera y 5 muestras la segunda. Los resultados promedio son presentados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Densidad aparente: método de la excavación.

Estrato	Muestra	Dap. (g cm^{-3})	Estrato	Muestra	Dap. (g cm^{-3})
0 – 15 cm	M1	1,16	15 – 30 cm	M1	1,31
	M2	1,25		M2	1,33
	M3	1,21		M3	1,30
	M4	1,12		M4	1,42
	M5	1,19		M5	1,34
	M6	1,16		M6	1,22
	M7	1,35		M7	1,28
	M8	1,15		M8	1,23
	M9	1,24		M9	1,23
	Promedio	1,22		Promedio	1,30

Los valores de densidad aparente adoptados fue el promedio de los valores obtenidos, es decir $1,22 \text{ g cm}^{-3}$ para el estrato de 0 a 15 cm y $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ para el estrato de 15 a 30 cm.

4.1.3 Salinidad del suelo

En el área de estudio y al inicio de la investigación, se recolectaron muestras compuesta, tomadas en forma aleatoria con el fin de obtener una mejor representatividad en los resultados esperados. Las muestras se hicieron en dos rangos de profundidades 0 – 15 cm y 15 – 30 cm.

- *Determinación de la salinidad mediante pasta saturada*

Usando el método de pasta saturada se obtiene la concentración de sales que están directamente relacionadas con el contenido que de ellas tiene el agua del suelo, cuando el suelo se encuentra en capacidad de campo. En el suelo seco es difícil interpretar los valores de porcentaje de sales ya que no se relaciona con la concentración del agua en el suelo. Rc Ticknell y Ritas (1961).

La metodología seguida para la determinación de la salinidad mediante pasta saturada, fue la siguiente:

- ✓ Se prepararon las muestras, mediante secado al aire, tritución y tamizado.
- ✓ Se determinó la textura del suelo por el método de Bouyoucos.
- ✓ Se determinó capacidad de intercambio catiónico (CIC).
- ✓ Se preparó la pasta saturada de suelo.
- ✓ Se determinó el porcentaje de saturación de la pasta.
- ✓ Se determinó el pH en la pasta.
- ✓ Se obtuvo el extracto de saturación a una succión de -25 kPa Durante un tiempo de 30 min.
- ✓ Se determinó cationes en el espectrofotómetro de absorción atómica.
- ✓ Se determinaron los aniones en el extracto de saturación por métodos volumétricos para CO₃, HCO₃, Cl, y SO₄, y por el método colorimétrico para el NO₃.
- ✓ Se realizó el análisis de agua utilizando los mismos métodos aplicados en la determinación de aniones y cationes del extracto de saturación del suelo.

- *Relación absorción de sodio (RAS)*

La relación de absorción de sodio indica el efecto la concentración relativa del catión sobre la acumulación de sodio en el suelo; es uno más confiable para determinar su efecto sobre las plantas, Carrow y Duncan (1998) proponen que en el suelo el valor del RAS no debería ser mayor de 12.

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{(Ca + Mg)/2}} \quad (4.1)$$

Donde, el RAS, es la relación de absorción de sodio, Na, Ca y Mg son símbolos químicos del sodio, calcio y magnesio respectivamente.

- *Capacidad de intercambio catiónico (CIC)*

Los nutrientes se encuentran en el suelo en forma de iones, los cuales tienen carga positiva o negativa (los de carga positiva se llaman cationes; los de carga negativa, aniones). Las partículas de arcilla y los coloides orgánicos tienen carga negativa en su superficie y atraen y retienen débilmente, los iones con carga positiva. Algunos cationes son retenidos más fuertemente que otros, lo que hace más difícil su lixiviación por acción del agua. Los iones hidrógeno de carga positiva, constituyen un subproducto de las raíces y de los organismos del suelo. Las raíces intercambian iones hidrógeno por otros nutrientes con carga positiva. y es la suma de los cationes en la solución y otro catión que se encuentre sobre cualquier material de una superficie activa, es decir, que la capacidad de intercambio catiónico o intercambio de base está determinada por la capacidad de retención de la arcilla o del humus. Cuanto mayor es dicha capacidad de retención mayor es la capacidad de intercambio catiónico.

Los iones se distinguen por sus características de movilidad por ejemplo el calcio y el magnesio poseen una movilidad similar al total de las sales, pero sin embargo el calcio es de mayor movilidad que el magnesio, aunque cuando la evaporación es mayor el magnesio tiene un movimiento ascendente debido a este gradiente de humedad. Por su parte el sodio no tiene un comportamiento igual a los otros cationes, es más dinámico y cambia a medida que el gradiente de humedad también cambia. El potasio es el catión que tiene la menor movilidad de todos, aunado a una menor concentración, estas dos características no le permite modificar su concentración en el suelo.

Los aniones mantienen la tendencia de la distribución de las sales en su conjunto, por ejemplo el cloro es altamente soluble y fácilmente lixiviado por las precipitaciones y son colocadas en estratos más profundos. Los sulfatos se comportan en forma similar al catión Calcio, y como también posee una alta concentración en el suelo se asocia muy fácilmente con otro ion para formar una sal. En cuanto los bicarbonatos poseen poca movilidad con respecto a todas las sales solubles.

Las aguas cargadas de sales procedentes de la meteorización de la corteza terrestre se acumulan en las depresiones, constituyendo mantos freáticos salinos. La mineralización progresiva de las aguas salinas depende de factores climáticos e hidrogeológicos. Los lavados con aguas de lluvia eliminan las sales en la zona. La evaporación y la transpiración consumen grandes cantidades de agua pero, no afectan prácticamente a las sales disueltas, por lo aumenta la concentración salina de las aguas. En el área donde predomina los factores salinizantes (evaporación y transpiración) frente a los de lavado, las aguas freáticas irán paulatinamente mineralizándose.

La calidad del agua de riego en cuanto a su concentración electrolítica, fue analizada para medir el aporte de sales al suelo por el agua del riego, y se monitorea la salinidad del agua de riego con la misma frecuencia que los análisis del suelo.

- *La interpretación de los análisis se describe a continuación*

Estrato 0 - 15 cm: textura medianamente fina (franco-arcillo-limosa); pH ligeramente alcalino; conductividad eléctrica salina; materia orgánica baja; fósforo disponible muy alto; potasio disponible alto; calcio y magnesio disponible muy alto. Al efectuar el análisis de salinidad se obtiene que el porcentaje de saturación de la pasta es igual a 39,6 %; el pH en la pasta es ligeramente alcalino; la conductividad eléctrica en el extracto es moderadamente salina. Predominan las sales de sulfato de calcio ($30,46 \text{ me l}^{-1}$). La relación de adsorción de sodio (RAS) es igual a 1,3 y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) es igual a 0,4. Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica USDA, el suelo se clasifica como moderadamente salino. Capacidad de intercambio catiónico (extracción con acetato de sodio) alta.

Estrato 15 – 30 cm: textura medianamente fina (franco-arcillo-limosa); pH ligeramente alcalino; conductividad eléctrica salina; materia orgánica baja; fósforo disponible muy alto; potasio disponible alto; calcio y magnesio disponible muy alto. Al efectuar el análisis de salinidad se obtiene que el porcentaje de saturación de la pasta es igual a 36,6 %; el pH en la pasta es ligeramente alcalino; la conductividad eléctrica en el extracto es moderadamente salina. Predominan las sales de sulfato de calcio ($32,62 \text{ me l}^{-1}$). La relación de adsorción de sodio (RAS) es igual a 1,34 y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) es igual a 0,7. Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica USDA, el suelo se clasifica como moderadamente salino. Capacidad de intercambio catiónico (extracción con acetato de sodio) baja.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados del análisis correspondiente al estado inicial del suelo en lo referente a salinidad.

4.1.4 Fertilidad del suelo

A las muestras de suelo, recolectadas al inicio del trabajo, se le realizaron análisis de fertilidad para definir el estado del suelo y a su vez para diseñar el programa de fertirrigación, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.3. Análisis de salinidad del suelo.



MINISTERIO DEL AMBIENTE
DIRECCION ESTADAL AMBIENTAL LARA
COORDINACION DE CONSERVACION AMBIENTAL
Laboratorio de Suelos y Aguas

RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE SALINIDAD EN EXTRACTO ACUOSO

ESTUDIO: Evaluación de salud en Hacienda Caujaral, Estado Lara

FECHA: 30 de julio de 2004

IDENTIFICACION: M-10 021604 (147) y M-20 021604 (148)

INTERESADO: CIDIAT

[illegible]

Ing. Agr. Beatriz Alexia Arrieché G.
Coordinadora del Laboratorio de Suelos y Aguas

Tabla 4.4. Análisis de fertilidad del suelo.



MINISTERIO DEL AMBIENTE
DIRECCION ESTADAL AMBIENTAL LARA
COORDINACION DE CONSERVACION AMBIENTAL
Laboratorio de Suelos y Aguas

RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE FERTILIDAD EN SUELOS

ESTUDIO: Fertilidad en Hacienda Caujeral, Estado Lara

FECHA: 30 de julio de 2004

IDENTIFICACION: M-10 021604 (147) y M-20 021604 (148)

INTERESADO: CIDIAT

[illegible]

Ing. Agr. Beatriz Alexia Arrieché G.
Coordinadora del Laboratorio de Suelos y Aguas

4.1.5 Retención de humedad

Para realizar las pruebas de retención de humedad, con énfasis en bajas tensiones, debido a que el suministro de agua al cultivo se planteó diariamente, se recolectaron muestras compuestas de suelo tomadas en forma aleatoria y a las dos profundidades consideradas. Esta prueba fue realizada en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes; los resultados, como promedio de tres repeticiones, se presentan en la Tabla 4.5

Tabla 4.5. Retención de humedad a diferentes tensiones.

Muestra	Tensión (kPa)							
	-5	-10	-20	-40	-60	-100	-500	-1500
0-15 cm	41,10	37,57	32,37	30,41	27,56	26,76	18,31	13,21
15-30 cm	31,49	28,72	27,35	22,93	23,72	24,31	18,35	17,44

4.1.6 Parámetros climáticos

Adyacente a la Parcela Experimental se ubicó una estación climática, la cual constaba de un anemómetro ubicado a 2 m de altura, una tina estándar de evaporación y un pluviómetro de cántaro. Los datos climáticos se registraron desde el día 04/03/04 hasta el 01/09/04 y se presentan en el Apéndice A.

4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Las técnicas estadísticas de diseño experimental tienen su razón de ser en la investigación empírica que trata de indagar cómo ciertas variables conocidas como *factores*, actúan sobre una variable respuesta registrada tras la realización del experimento.

Es importante destacar que los factores que influyen sobre el valor de la variable respuesta sólo pueden tomar un número finito de estados o *niveles*; entendiendo como *niveles* a los tipos o grados específicos del factor que se utilizarán en el experimento.

Los tests básicos de estos modelos se centran en contrastar si los factores alteran realmente los resultados de los experimentos al fijarlos en sus diferentes niveles. La técnica, que consiste en descomponer la variabilidad total en las variabilidades aportadas por los diferentes factores y sus interacciones mutuas, recibe el nombre de *análisis de varianza*.

El Diseño Experimental se realizó con arreglo de tratamiento factorial, en el cual se consideraron los siguientes factores y niveles: Factor I: Densidad de siembra con tres (3) niveles; 430.000 plantas ha⁻¹ (0,15m x 0,10m; 6 hileras por cama); 570.000 plantas ha⁻¹ (0,15m x 0,075m; 6 hileras por cama); 860.000 plantas ha⁻¹ (0,15m x 0,05m; 6 hileras por cama. *Factor II*:

Formas de aplicación del agua de riego en lo referente al tiempo de riego con *dos (2) niveles*; tiempo total de riego por día en dos partes (aplicación 2 veces al día); tiempo total de riego por día en tres partes (aplicación 3 veces al día).

Esto da como resultado seis (6) tratamientos con cuatro (4) repeticiones, lo cual permite estudiar con suficiente precisión el comportamiento de los tratamientos evaluados.

La distribución de los tratamientos en el campo se presenta en la Figura 4.2; en cada tratamiento se consideraron tres (3) camas o planchas para las tres primeras repeticiones y (2) dos camas en la cuarta repetición, para un total de sesenta y seis camas.

El Área Experimental se dividió en veinticuatro (24) módulos correspondientes a los seis tratamientos y cuatro repeticiones consideradas en el diseño experimental.

4.3 SISTEMA DE RIEGO

El sistema de riego fue suministrado por la empresa Agroisleña C.A, el mismo consistió de un *cabezal de riego* compuesto por una batería de dos filtros de anillas con retrolavado, marca AZUD Modelo MIX A-25 / M de 130 micrones con un colector de arena y llave de paso rápido; un inyector tipo venturi de $\frac{3}{4}$ " conectado en paralelo a una válvula de bola para provocar una diferencia de presión y obligar a la circulación del agua; para una mayor regulación y control del fertilizante tenía instalado un flotámetro y una válvula dosificadora. El equipo de filtrado incluye otros accesorios como una llave con manguera para el llenado del tanque y limpieza del equipo, cinco llaves de bola, una ventosa de 2" y tres manómetros de glicerina; dos de estos manómetros están ubicados a la entrada y salida de los filtros y el otro en la descarga hacia el sistema. Todos estos equipos se muestran en la Figura 4.3.

La tubería principal de abastecimiento fue de PEAD-90 mm, la cual tenía al inicio una válvula de bola de PVC (PE/PE) de 90 mm, una ventosa de 2" y un contador tipo *Woltmann* 80 x 3" y tomas manométricas; la tubería secundaria era de PEAD-63 mm, de ésta se derivan 24 tramos de tubería terciaria de PEAD-32 mm, a la cual van conectadas 24 válvulas de bola de PVC (PE/PE) de 32 mm y 24 reguladores de presión marca *Rain Bird*, modelo PSI- M10 y tomas manométricas, todos estos accesorios corresponden a los respectivos tratamientos.

En cada tratamiento, se conectan a la tubería terciaria nueve líneas de cinta de goteo de 86 m cada una en promedio, para un total aproximado de 18.400 m. En la Figura 4.4 se aprecia la distribución indicada.

El propietario de la Hacienda suministró una bomba marca Tuboven D-60, 3" x 4" con motor diesel tipo 1052 de 40 CV y 2800 rpm; además, se instaló un filtro de grava y un filtro de malla a la salida de la bomba.

La cinta de goteo, suministrada por Agroisleña C.A, fue de marca *Siberline* P-1, calibre 15000, con distancia entre goteros de 33 cm, de caudal nominal de $1,4 \text{ l h}^{-1}$, para una presión de 1 bar. El coeficiente de variación, proporcionado por el fabricante, es $C_v = 0,03$ y la ecuación de descarga $q = 0,412 \text{ h}^{0,513} (\text{PSI}; \text{l h}^{-1})$.

www.bdigital.ula.ve

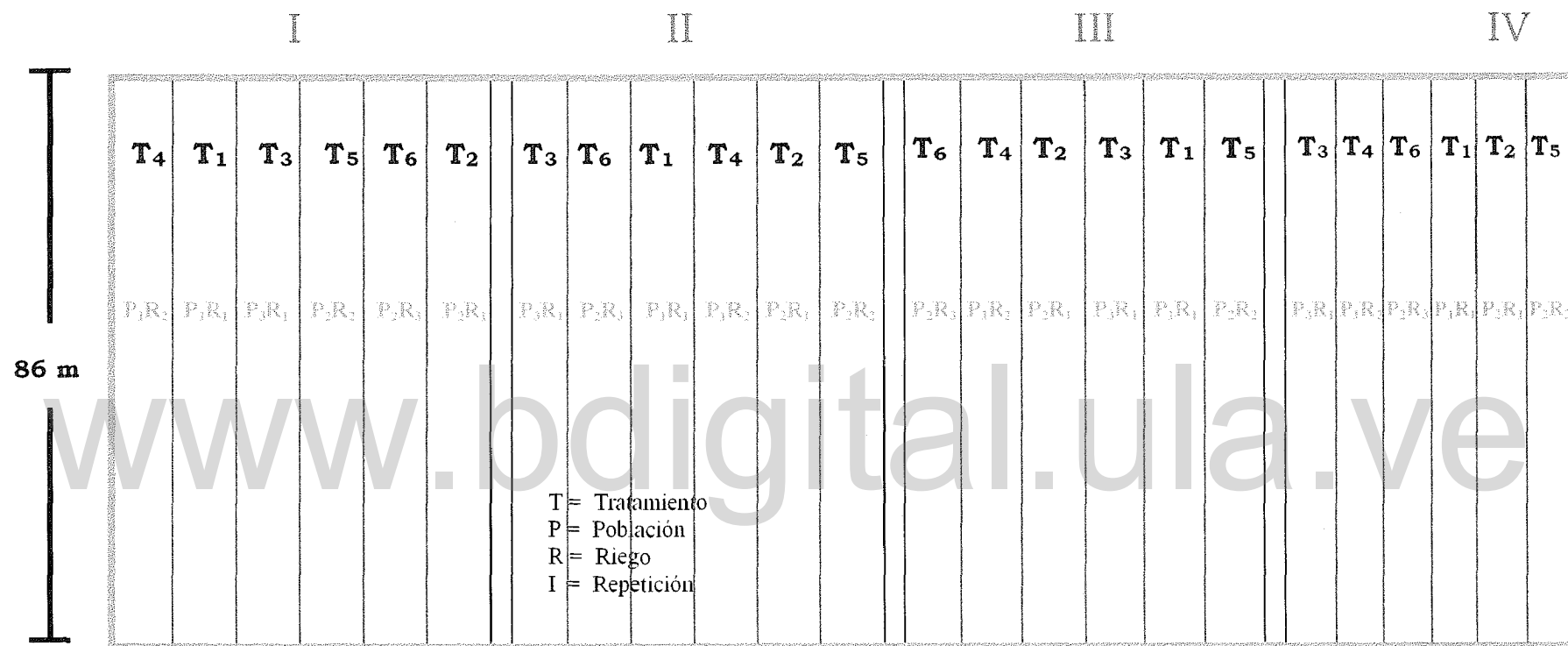
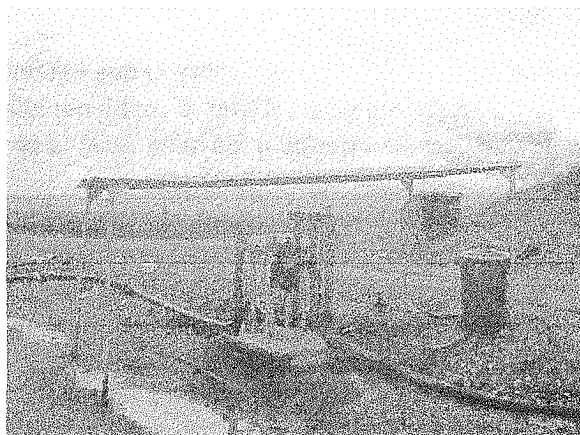


Figura 4.2. Diseño Experimental - Plano de distribución de tratamiento.

Durante los días 5 y 6 de abril de 2004 se instaló el sistema de riego; la instalación de las cintas de goteo se realizó manualmente. En la Figura 4.4 se muestra el sistema de cintas de goteo instaladas.



Figuras 4.3. Foto del cabezal de riego.



Figura 4.4. Foto de distribución del sistema.

4.3.1 Evaluación de la cinta de goteo a distintos espaciamientos y distintas formas de preparación del terreno.

Con la finalidad de observar el comportamiento de la cinta de goteo suministrada, en las condiciones propias del suelo a instalarse, se probaron distintos espaciamientos entre ellas, del orden de los 60 cm, 45 cm, 35 cm y 30 cm. Estas evaluaciones fueron necesarias ya que el caudal de la cinta de goteo proporcionada era de una magnitud mayor a lo recomendable en ese tipo de suelo.

Es importante mencionar que las evaluaciones fueron realizadas en el mismo suelo donde se llevó a cabo la investigación; esto permitió observar el comportamiento particular de éste, en lo referente al ancho, forma y profundidad de mojado, con cintas ubicadas superficialmente y enterradas y con diferentes niveles de mecanización; de esta manera se pudo definir el espaciamiento entre cintas de goteo a adoptar.

En cultivos de alta densidad como la cebolla, es necesario que los humedecimientos superficiales y en profundidad deban solaparse lo suficiente para lograr el ambiente adecuado para el transplante y desarrollo del cultivo, además de que permitan trasladar las sales hacia la periferia.

La información recolectada referente a tiempo de mojado, profundidad de mojado, solapamiento superficial de bulbos, contenido de humedad gravimétrico, lecturas de tensiómetros y frecuencia de aplicaciones de agua, permitieron concluir que los espaciamientos entre cintas de 60, 45, y 35 cm no garantizaban la distribución requerida de humedad, para el esquema de siembra en camas o planchas, como se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.5 Humedecimientos a distintos espaciamientos entre cintas.

Las camas al tener una geometría de 1,20 m entre surcos, requirió la ubicación de 3 cintas espaciadas 30 cm entre ellas, las cuales sólo permiten, en esos suelos, ubicar seis (6) hileras de plantas. El colocar tres cintas por cama encarece el sistema, no obstante un menor número de

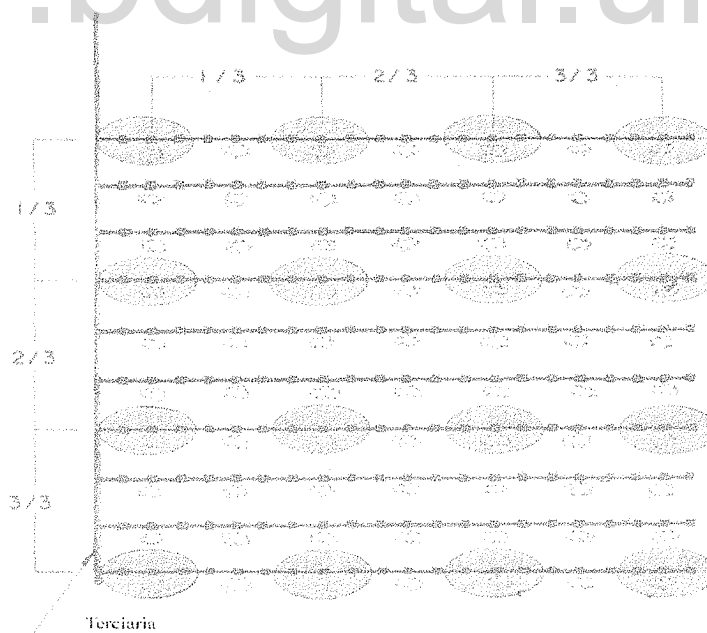
líneas de goteo, con el caudal nominal mencionado, no garantiza el patrón de humedecimiento requerido.

4.3.2 Evaluación hidráulica de la cinta de goteo

Instalado el sistema de riego se procedió a comprobar su funcionamiento y la calidad de la cinta suministrada a través de pruebas de evaluación hidráulica realizadas al inicio y durante el ciclo del cultivo. Las evaluaciones se realizaron periódicamente con la finalidad de hacerle un seguimiento respecto a su funcionamiento hidráulico y determinar así la uniformidad de aplicación. La cinta de goteo suministrada no es la más adecuada en lo referente a espaciamientos entre goteros y al caudal aplicado, ya que el estudio realizado por SHYQ-CA y CIDIAT (2003) concluye que para los suelos del Valle, es requerido goteros de bajo caudal y espaciamientos adecuados.

El procedimiento seguido fue elegir cuatro cintas emisoras, de manera que una se localice lo más cercano al punto de alimentación de la terciaria, otra será la más alejada de ese punto y las otras dos situadas a un tercio y dos tercios de la longitud que separe a las dos primeras.

En cada una de estas cintas se seleccionaron cuatro goteros. El primero se ubicó lo más cercano al punto de alimentación del lateral, el último fue el más alejado y entre ambos, se eligieron los situados a un tercio y dos tercios de la separación entre los dos primeros, como se muestra en la Figura 4.6.



Elección de los sitios de evaluación

Figura 4.6. Elección de los sitios de evaluación.

En los dieciséis (16) tramos seleccionados se recogieron los volúmenes de agua aportada por un gotero durante 5 minutos, y se convirtió a unidades de caudal; asimismo, se midieron las presiones de entrada, al inicio, durante y al final de la prueba, en cada uno de los tratamientos.

Con los datos de caudales recogidos en el campo, se calculó el coeficiente de uniformidad de riego mediante la ecuación:

$$CU = \frac{q_{25\%}}{q_{med}} \quad (4.2)$$

donde:

CU es el coeficiente de uniformidad de riego de la unidad evaluada en campo.

$q_{25\%}$ es la media del 25% de valores más bajos de caudales registrados, de todas las medidas realizadas en campo.

q_{med} es la media de todos los caudales registrados en campo.

Estas evaluaciones se realizaron con una presión, a la salida del cabezal, de 1 bar, regulándose ésta en las diferentes llaves de entrada a los laterales, por medio de reguladores de presión, a 0,7 bar (10 PSI). Los resultados de las pruebas de campo se presentan en la Tabla 4.6.

4.4 OPERACIÓN Y MANEJO DEL RIEGO

En el sistema suelo-planta-atmósfera, la transferencia de agua se realiza en respuesta a diferencias de potenciales de agua establecidos entre el suelo, la planta y la atmósfera; es decir, el movimiento de agua del suelo a las raíces se establece en función de un gradiente de potencial formado entre el suelo y las células de las raíces de la planta. A su vez la transferencia de agua de las raíces a las hojas es producto de la respuesta de los gradientes de potencial existente entre esas dos partes de la planta. También la pérdida de agua de la planta al ambiente exterior sucede en respuesta a la diferencia de potenciales entre la atmósfera y las células transpirativas de la planta.

Es importante considerar la influencia negativa de la salinidad en los cultivos, la cual puede ser motivada por dos situaciones: por la toxicidad directa de ciertas sales y por el incremento del porcentaje de agua necesario, ya que las sales retienen por ósmosis parte del agua existente, compitiendo con las raíces, que se ven obligadas a realizar un mayor esfuerzo para poder absorberla.

Este esfuerzo será mayor, cuantas más sales haya, pudiéndose llegar a una situación límite, donde la planta cultivada es incapaz de absorber agua, aunque el terreno esté prácticamente encharcado, ya que las fuerzas de retención de las sales (potencial osmótico), es superior a la fuerza de succión de las raíces.

Tabla 4.6. Evaluación hidráulica de la cinta de goteo.

Coeficiente de uniformidad. Tiempo 5 min.						
Fecha	Cama	inicio	1/3	2/3	fin	Resultados
07-05-04	1	200	200	172	167	Cu: 80%
(23 DDT)	22	150	125	117	117	$q_{25\%}: 1,52 \text{ l h}^{-1}$
	44	166	167	167	167	$q_{med}: 1,90 \text{ l h}^{-1}$
	66	154	150	148	164	Pe: 100 kPa
Fecha	Cama	inicio	1/3	2/3	fin	Resultados
04-06-04	1	105	98,3	95,4	100	Cu: 89,81%
(51 DDT)	22	78	89,3	80,4	78,1	$q_{25\%}: 0,93 \text{ l h}^{-1}$
	44	82,3	77,2	84	80,2	$q_{med}: 1,03 \text{ l h}^{-1}$
	66	84	77	76,2	87,4	Pe: 70 kPa
Fecha	Cama	inicio	1/3	2/3	fin	Resultados
07-07-04	1	93	86,4	86	86	Cu: 85,91%
(84 DDT)	22	70	86,2	72	69	$q_{25\%}: 0,83 \text{ l h}^{-1}$
	44	85	86	92	80	$q_{med}: 0,97 \text{ l h}^{-1}$
	66	82	73	75	65,4	Pe: 70 kPa
Fecha	Cama	inicio	1/3	2/3	fin	Resultados
18-08-04	1	91,6	85,6	89,4	81,4	Cu: 91,1%
(126 DDT)	22	82,6	77,6	80,2	77,8	$q_{25\%}: 0,87 \text{ l h}^{-1}$
	44	79	77,4	76	69,2	$q_{med}: 0,96 \text{ l h}^{-1}$
	66	79,6	81,6	72,6	72,2	Pe: 70 kPa

El riego de la cebolla, así como otros cultivos, es programado sobre la base de una frecuencia de riego ajustada al tiempo o a mediciones o estimaciones del contenido de humedad del suelo. La productividad de los cultivos y su calidad puede ser maximizada por la combinación perfecta del balance de la humedad en el suelo, de acuerdo a las necesidades de las plantas; en tal sentido el agua, los nitratos y las pérdidas de los agroquímicos podrán ser reducidos sustancialmente si se usa el riego de manera eficiente.

La programación del riego utilizando el potencial hídrico del suelo provee un método preciso para el mantenimiento adecuado de la humedad en el suelo, llevando a óptimos rendimientos y calidad de la cebolla, como respuesta a un manejo adecuado de esta humedad, de los umbrales de riego y de las condiciones de salinidad.

El uso de medidas de tensión de agua en el suelo para el control de riego tiene como ventaja principal la posibilidad de extrapolar los resultados a suelos semejantes, con pocas modificaciones metodológicas. Esto es posible hacerlo debido a que el consumo de agua por la planta es realizado en respuesta a las diferencias de potenciales que producen, en cierta forma, un efecto semejante en la planta, independientemente del lugar considerado.

Es importante destacar que las condiciones de suelo encontradas en el Valle de Quibor son favorables para la utilización de tensiómetros como instrumentos básicos de monitoreo del potencial hídrico del suelo y del agua disponible para la planta, utilizándose no solamente para definir el momento sino también para definir las cantidades de agua de riego a aplicar al cultivo.

4.4.1 Criterios para el manejo del riego de la cebolla

La cebolla es un cultivo que responde bien al riego en todo su ciclo vegetativo, presentando estadios de mayor sensibilidad al déficit de humedad. En el período de formación y crecimiento de los bulbos, una baja disponibilidad de agua en el suelo causa una reducción acentuada en la productividad del cultivo.

En las fases iniciales del desarrollo de la planta, el crecimiento es lento, el sistema de raíces es débil y situado a poca profundidad. Por eso, el riego regular es una actividad de gran importancia para aumentar el rendimiento. Para lograr bulbos comerciales más compactos y de buena condición de almacenaje, después que éstos se han formado, los riegos deben ser reducidos y en el período de maduración (2 a 3 semanas antes de la recolección), han de cesar completamente.

No se debe olvidar que como consecuencia de un riego muy abundante durante el período de formación de los bulbos, es muy probable que se afecte el proceso de acumulación de sustancias nutritivas en las túnicas carnosas o anillos, que se estimule y germine en estadio de latencia, que no se formen bulbos normales o que sean relativamente deformados. Todo eso será más cierto, cuanto más alto sea el nivel de nitrógeno.

En razón de que no existe información publicada, que se conozca, relacionada con la siembra del cultivo de cebolla a diferentes espaciamientos y con riego de alta frecuencia en suelos arcillosos, se establecieron criterios de aplicación de agua, en el área experimental, fundamentados en experiencias propias. Estas se ajustaron a las etapas fenológicas del cultivo, considerando diferentes niveles de potencial hídrico del suelo. Abreu et al. (1980) estudiaron los efectos de cinco regímenes de riego sobre la producción y el tamaño de los bulbos, obteniendo mejores rendimientos en un suelo a un potencial mátrico de -10 kPa.

Para cada una de las etapas fenológicas, se adecuó un manejo del agua en función a una humedad necesaria del suelo. Las etapas consideradas del riego son:

- Riegos de asiento o transplante
- Riegos de establecimiento
- Riegos de crecimiento y desarrollo
- Riegos de bulbificación
- Riegos finales

Para fines de trasplante, se realizaron riegos de asiento, que consistieron en una aplicación en cantidad suficiente de agua de manera que garantizara un mojado adecuado y uniforme sobre las camas, y así facilitar la tarea de siembra de las plántulas.

Es importante mencionar que las condiciones climáticas durante el desarrollo de esta investigación fueron totalmente atípicas. Se registraron datos de precipitación próximos a lo que llueve durante todo el año en el Valle.

La fase de establecimiento o post trasplante del cultivo es de mucho estrés para las plántulas, es por ello que se consideró, durante las siguientes cuatro semanas después del trasplante, un contenido de humedad en el suelo próximo a capacidad de campo, de manera tal que sus raíces se adapten adecuadamente. En estas semanas el valor promedio del potencial mátrico del suelo fue de -10 kPa, a una profundidad de 0,10 m.

Durante la siguiente etapa, llamada de crecimiento, fue necesario garantizar una humedad a las nuevas exigencias de las plantas. El crecimiento rápido se ve traducido en una fuerte estructura de la planta, que garantiza un mejor producto. El rango de potencial mátrico fue manejado entre -12 y -20 kPa, a una profundidad de 0,10 m.

La etapa de bulbificación se inicia dependiendo de varios factores como la temperatura y el fotoperiodo que estimulan a la planta a almacenar en el bulbo, durante esta etapa las demandas hídricas fueron suplidas manteniendo un potencial mátrico promedio de -25 kPa. Esta etapa se identifica a través del Índice de Bulbificación, el cual es la relación entre el diámetro mayor del bulbo y el diámetro menor del cuello; una relación mayor a dos indica que el proceso de la bulbificación ya comenzó.

Para la etapa final se adecuó una práctica llamada “seca”, la cual consiste en un estrés hídrico que obliga a la planta a iniciar o terminar su llenado. Esta práctica se realiza en condiciones de excesos de lluvia o posibles efectos de alta densidad de plantas. El lapso de estrés hídrico no fue mayor a tres días, registrando altos valores de potencial hídrico, -100 kPa, equivalente a bajo contenido de humedad. La reposición se hizo para un valor promedio de tensión de -30 kPa.

4.4.2 Estrategia de aplicación de agua

El problema de la salinidad tanto del agua como del suelo del Valle de Quibor, ha sido y sigue siendo uno de los factores al que mayor atención se presta en la zona y puede favorecer una rápida expansión de los riegos localizados.

Para la estrategia de aplicación de agua aplicada en el presente trabajo se tomó en cuenta que gran parte de las sales que aporta el agua quedan en el suelo, una vez que la planta ha satisfecho sus necesidades, sumándose a las ya existentes en él, concentrándose al desaparecer el agua, ya por la extracción de la planta o por pérdidas por evaporación.

Dentro del bulbo de humedad que caracteriza al riego por goteo y como consecuencia de la alta frecuencia de aplicación hídrica (a veces hasta varias veces al día), las sales son desplazadas hacia los límites de éste, dejando el resto en unas condiciones de salinidad entre una y dos veces la del agua de riego, de ahí el por qué de su ventaja.

Se tienen entonces dos zonas claras de acumulación de sales en el bulbo, una en la periferia y otra sobre la superficie del suelo al alejarnos del gotero, como consecuencia de la evaporación; pero de igual forma que el agua de riego las desplaza en un sentido determinado, también pueden ser trasladadas por otros fenómenos, como la lluvia.

Las lluvias producen la desorganización del desplazamiento de humedad que mantiene el riego por goteo, ya que movilizan las sales que iban siendo acumuladas en los límites y sobre la superficie, tendiendo éstas a repartirse de forma homogénea en el suelo, de tal forma que pueden introducirse en el bulbo donde se tiene concentrado el sistema radicular, lo que puede ocasionar graves daños al cultivo.

La intensidad de las lluvias también es un factor muy importante a tener en cuenta, así por ejemplo una precipitación de 10 a 30 mm no llega a profundizar por debajo de la zona de raíces, con lo que introducirá las sales en pleno bulbo. El tipo de suelo también influirá en el desplazamiento salino; cuando la intensidad de precipitación es superior a la velocidad de infiltración del suelo, se producen escorrentías con peligro de erosión, por lo que esta agua no se puede contabilizar para los lavados ya que no se infiltra.

Suele ser muy frecuente encontrar graves problemas cuando después de una lluvia se ha detenido el riego, el cual se agudiza cuando esto ocurre por un periodo relativamente largo. Manteniendo el riego se consigue desplazar las sales hacia las partes laterales, volviendo a reestablecer las condiciones anteriores, favoreciendo además con el exceso de agua la percolación en profundidad, que arrastrará gran cantidad de sales.

Con esto no se pretende aconsejar que se siga regando sin tener en cuenta las lluvias, sino por el contrario mantener uno o dos riegos durante y después de éstas, si se puede con mayor volumen de agua y entonces detener el riego hasta que el grado de humedad nos lo permita.

En muchos casos suele aparecer la línea de humectación seca, mientras la calle permanece prácticamente encharcada, apareciendo seca en poco tiempo por la demanda de la planta, la causa fundamental es la gran mayoría de las raíces que están localizadas en esa franja.

- *Este fenómeno ocasiona un doble efecto:*

* Al disminuir la cantidad de agua del nivel del suelo, las sales se concentran excesivamente.

* Por capilaridad, el agua se desplaza desde la calle introduciendo a su paso las sales de la periferia hacia el interior del bulbo (inversión de sales).

Por tales motivos, no se debe retrasar en exceso el inicio del riego. Esta decisión se podrá tomar fácilmente si se tiene en cuenta la lectura de los tensiómetros que informarán cuándo el nivel de humedad no es adecuado.

La estrategia de operación y manejo adoptada para el presente trabajo de investigación se basa en el conocimiento, en tiempo real, de las variaciones de tensión de agua en el suelo, medida por medio de tensiómetros, para así definir el momento de riego y al mismo tiempo determinar la cantidad de agua necesaria para reponer el déficit hídrico en un tiempo de riego y para una frecuencia diaria.

Los tensiómetros se instalaron en la zona de adsorción del sistema radicular de la planta, por lo que es necesario conocer la distribución espacial de raíces absorbentes del cultivo.

Para la condición particular del cultivo de cebolla se consideró colocar estos instrumentos a 10 cm, como profundidad media del estrato de 0 a 15 cm y lugar donde se ubicará la mayor densidad de raíces.

Se instalaron 5 tensiómetros en total; dos (2) en la primera réplica, en los tratamientos T3 y T4; uno (1) en la segunda réplica, en el tratamiento T3; dos (2) en la tercera réplica, en los tratamientos T2 y T3, como se presenta en las Figuras 4.7 y 4.8.

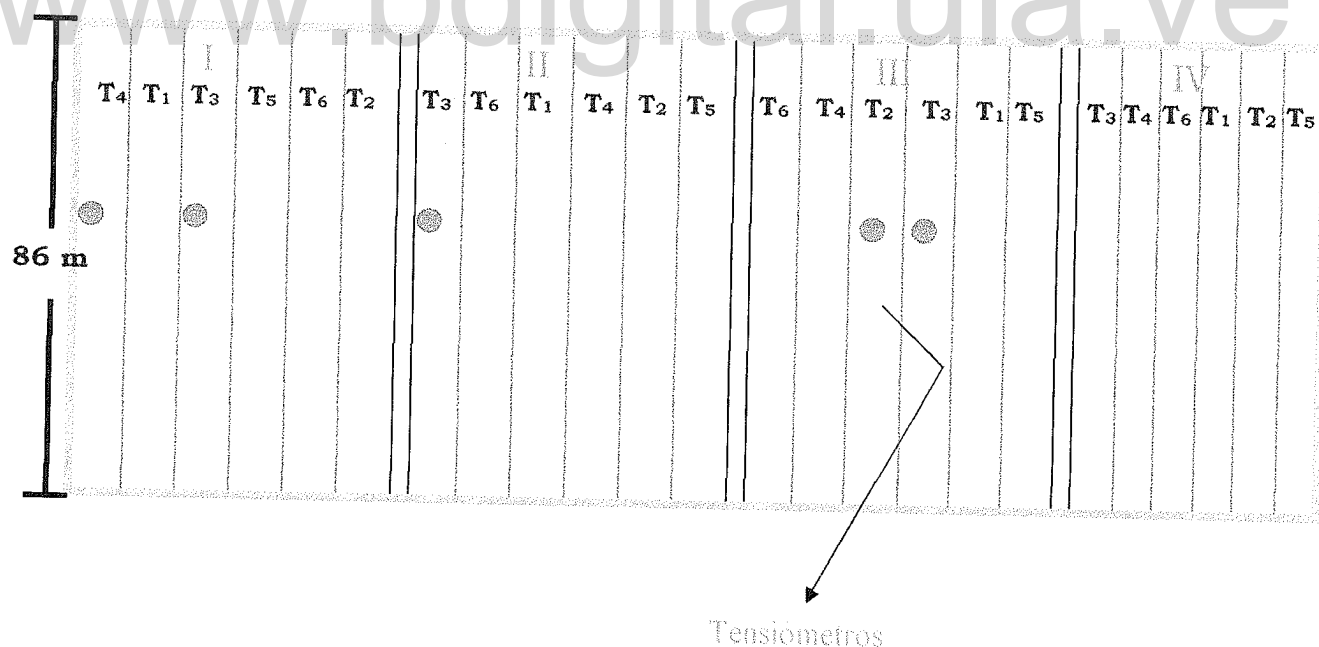


Figura 4.7. Distribución de tensiómetros en el diseño experimental

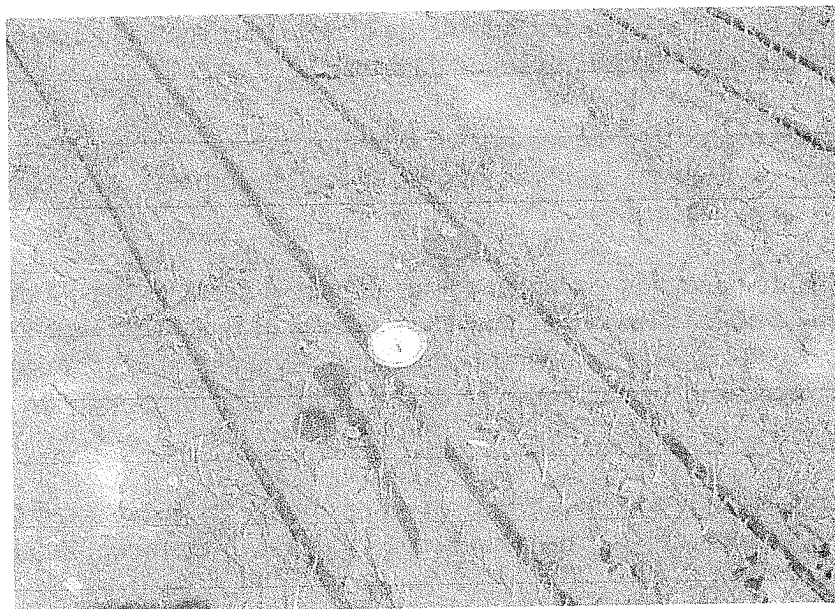


Figura 4.8. Ubicación de tensiómetros.

4.4.3 Lámina de reposición

Para el esquema de manejo de riego propuesto para el cultivo de cebolla en los suelos de la Serie Quibor, en el Valle de Quibor, se consideró necesario y suficiente conocer las características de retención de agua de los estratos de suelo de 0 a 15 cm y de 15 a 30 cm. La lámina de agua para reposición en el primer estrato fue obtenida por la lectura de los tensiómetros instalados a 10 cm de profundidad y para el segundo estrato con medidas del tensiómetro instalado a 15 cm de profundidad.

4.4.4 Curvas de retención

La curva de retención es una expresión de la energía con que un determinado contenido de agua se encuentra retenido en el suelo. Mediante muestras de suelo representativas de las condiciones de textura y estructura de suelo en el campo, es posible determinar en el laboratorio una relación entre un nivel dado de tensión y su correspondiente valor de cantidad de agua. El método de laboratorio utilizado para la determinación de la curva de retención fue el de la olla de presión por ser el disponible en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes.

En la Figura 4.9 se presentan las curvas de retención de agua, las cuales fueron modeladas a partir de 8 puntos de tensión vs contenido de humedad. Los valores puntuales de contenido de agua en el suelo, de la curva de retención, han sido ajustados mediante el modelo matemático de van Genuchten (1980), utilizando la técnica estadística de regresión no – lineal (Kennedy y Gentle, 1980); este modelo es uno de los más adecuados para representar el fenómeno de retención de agua en el suelo para diversas aplicaciones, inclusive para movimiento de agua en el suelo.

El modelo está representado por la siguiente ecuación:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{(1/n) - 1} \quad (4.3)$$

donde:

- θ es el contenido de agua en el suelo, cm^3 agua / cm^3 suelo;
- θ_s es el contenido de agua en el suelo a saturación, cm^3 agua / cm^3 suelo;
- θ_r es el valor residual de contenido de agua en el suelo cuando la tensión tiende al infinito, cm^3 agua / cm^3 suelo;
- α parámetro empírico de ajuste, kPa ;
- n parámetro empírico de ajuste, adimensional;
- h es la tensión de agua en el suelo, kPa .

Existen varias rutinas en programas estadísticos que pueden ser utilizados para realizar el ajuste del modelo. En este trabajo se utilizó la función “Solver”, que se encuentra en la hoja de cálculo Excel de Microsoft, para ajustar los parámetros del modelo (θ_r , α , n), fijándose un valor de θ_s igual a la porosidad total del suelo; los resultados se presentan en la Tabla 4.7.

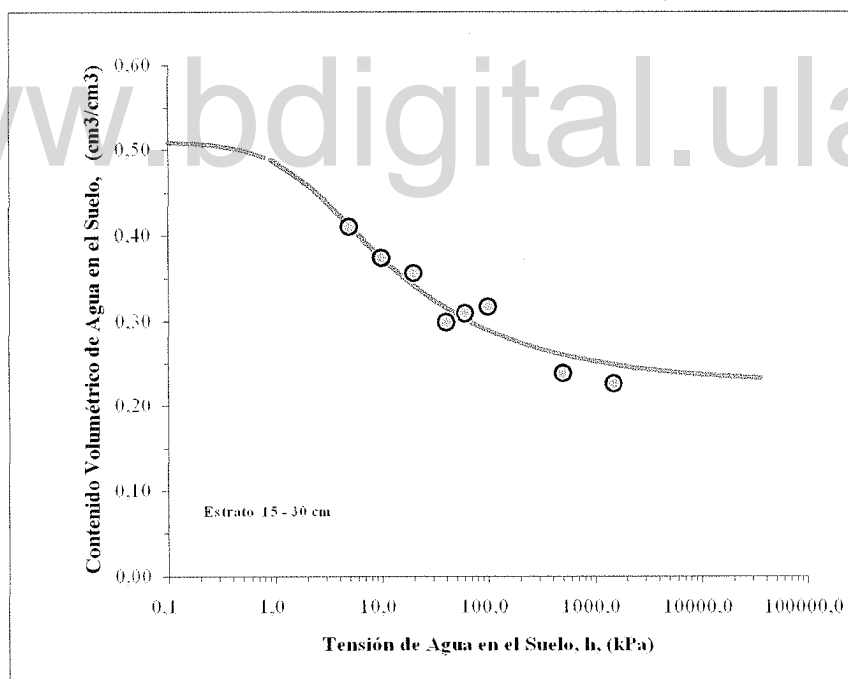
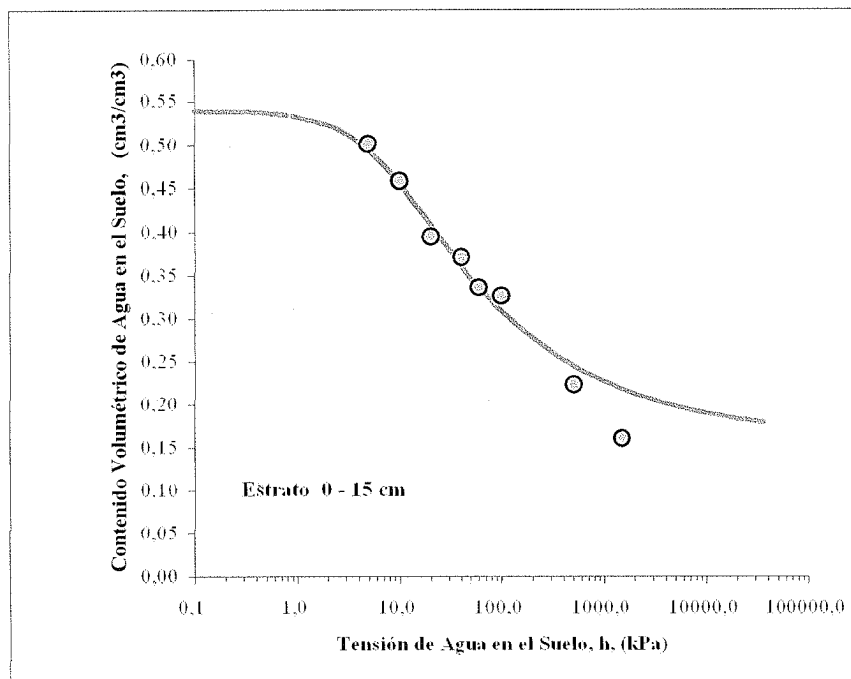


Figura 4.9. Curvas de retención de humedad.

Tabla 4.7. Optimización de la curva retención.

ENTRADA DE DATOS				
ÁREA IRRIGADA		CURVA DE RETENCION		
Propietario:	Sr. Emilio García	Tensión (atm)	Humedad gravimétrica	
Local:	Hacienda El Caujara	0,0493	(0-15 cm)	(15-30 cm)
Dirección:		0,0987	0,3757	0,2872
Municipio/Estado:	Quibor / Lara	0,1974	0,3237	0,2735
Teléfono:		0,3948	0,3041	0,2293
		0,5922	0,2756	0,2372
		0,9869	0,2676	0,2431
Fax.:		4,9346	0,1831	0,1835
		14,8058	0,1321	0,1744
		Dens. (g/cm³)	1,22	1,30
Eficiencia de Riego:	85,0%	CC (atm)	0,0988	0,247
Unidad de tensiómetro:	cbar	PMP (atm)	0,1321	0,1744
PARAMETROS DE DATOS DE RETENCION				
		Contenido volumétrico de agua en el suelo (cm³/cm³)		
Tensión (kPa)		obs	Calc	dif.
5,00		0,5014	0,4948	0,006664
10,00		0,4584	0,4564	0,001976
20,00		0,3949	0,4090	-0,014102
40,00		0,3710	0,3618	0,009198
60,00		0,3362	0,3368	-0,000534
100,00		0,3265	0,3088	0,017657
500,00		0,2234	0,2453	-0,021962
1500,00		0,1612	0,2183	-0,057153
		Capa de 0-15 cm		Capa de 15-30 cm
Saturación,	q _s (cm³/cm³)	0,5396		0,5094
Hum. Residual,	q _r (cm³/cm³)	0,1612		0,2267
Parámetros optimizados				
Hum. Residual,	q _r (cm³/cm³)	0,2036		0,2267
N		1,3531		1,3866
a (kPa ⁻¹)		0,1409		0,4993
Suma de cuadrados		0,000332070		0,000529918

4.4.5 Lámina de agua de riego

Para el cálculo de la lámina de agua, en función del nivel de agua del suelo, es conveniente definir un límite superior de agua retenida a partir de la cual cualquier agua adicional estaría sujeta a un rápido drenaje por los macroporos y por lo tanto, no es aprovechada por la planta. Ese límite máximo de agua retenida en el suelo es denominado capacidad de campo, el cual fue obtenido de medidas directas de campo por proceso de distribución de agua después que el suelo fue saturado.

Definido el límite superior de agua disponible y conocido el contenido de agua presente en el suelo en el momento de riego (HA), se aplica la siguiente ecuación para determinar la deficiencia hídrica del suelo a ser repuesta por el riego:

$$db = \left(\frac{CC - HA}{Ef} \right) Pr \quad dap \quad (4.4)$$

donde:

db lámina bruta a ser aplicada, mm.

Pr profundidad media de mojado del estrato de suelo a ser regado dependiente de la profundidad de raíces considerada, mm.

dap densidad aparente del suelo, gr/cm³

Ef eficiencia de riego del sistema.

CC límite superior de almacenamiento disponible de agua en el suelo, cm³ agua/cm³ suelo.

HA humedad actual al momento de riego, cm³ agua/cm³ suelo.

Las láminas brutas han sido previamente determinadas a partir de la optimización del modelo de van Genutchen, utilizando una gama de valores de tensiones esperadas, antes del riego, a lo largo del ciclo del cultivo; los resultados se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Lámina bruta de riego.

LAMINAS BRUTAS DE REPOSICION DE AGUA

PROPIETARIO: Sr. Emilio García
 LOCALIDAD: Hacienda El Cuyabral
 MUNICIPIO/ESTADO: Quibor / Lara
 EFICIENCIA: 85,0%
 CAP. CAMPO (atm): 0,0988

0,247

LECTURA DE TENSIOMETROS	PROFUNDIDAD DE TENSIOMETROS (cm)	
cbar	10	15
----- (mm) -----		
5,0	-4,4	-13,9
7,5	-2,0	-10,0
10,0	0,1	-7,3
12,0	1,5	-5,7
14,0	2,7	-4,4
16,0	3,8	-3,3
18,0	4,8	-2,3
20,0	5,7	-1,5
22,0	6,5	-0,8
24,0	7,2	-0,2
26,0	7,8	0,4
28,0	8,4	0,9
30,0	9,0	1,3
32,0	9,5	1,7
34,0	10,0	2,1
36,0	10,4	2,5
38,0	10,8	2,8
40,0	11,2	3,1
42,5	11,7	3,5
45,0	12,1	3,8
47,5	12,5	4,1
50,0	12,9	4,4
52,5	13,2	4,6
55,0	13,5	4,9
57,5	13,9	5,1
60,0	14,2	5,3
62,5	14,4	5,5
65,0	14,7	5,7
67,5	15,0	5,9
70,0	15,2	6,1
72,5	15,4	6,3
Capa de suelo (cm) ==>	0 - 15	15 - 30

4.5 ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO

4.5.1 Preparación de tierras

El agricultor del Valle ha logrado estructurar un esquema de preparación del suelos que consiste en realizar mínimo tres pases de subsolador acompañado de 6 a 8 pases de rastra, con la correspondiente nivelación, láser en algunos casos, para terminar con la surcadora o pases de arado; de presentarse algunas lluvias fuera de la temporada el número de pases de rastra es mayor.

- *Mecanización del suelo deseada*

La mecanización de los suelos se redujo al 70% de lo que habitualmente se realiza, esto garantizará un nivel de mullido y terrones aceptables para el ensayo. La mecanización fue de 2 pases de arado de vertedera, 1 pase de arado de discos y 2 pases de niveladora *Land Plain* en forma circular, se obvió la nivelación láser. Este nivel de preparación de tierra fue cónsono con las pautas de mecanización establecidas para este tipo de cultivo.

- *Incorporación de fertilizantes y materia orgánica*

Siguiendo las recomendaciones técnicas de la empresa Agroisleña C.A, se realizó la incorporación de fertilizantes mediante el uso de una abonadora mecánica. Los fertilizantes fueron 175 Kg ha^{-1} de sulfato de magnesio (MgSO_4) y 175 Kg ha^{-1} de sulfato de potasio (KSO_4). Además, con la finalidad de mejorar las propiedades físicas del suelo, se aplicó como enmienda, una mezcla de compost de 26 Tn en un área de 7.000 m^2 , esto hace una aplicación de $37,1 \text{ Tn ha}^{-1}$, mezclado con 356 Kg de azufre, equivalentes a $0,51 \text{ Tn ha}^{-1}$. En la Figura 4.10 se aprecia la aplicación de fertilizantes y materia orgánica.

En la preparación de las camas se utilizó una surcadora de dos puntas espaciadas a 150 cm, esto para realizar los surcos o pasillos, luego se conformó las camas con el *rotavactor* para darle un adecuado mullido al terreno, quedando las mismas de 120 cm de ancho con una superficie por alisar; en total se prepararon 66 camas.

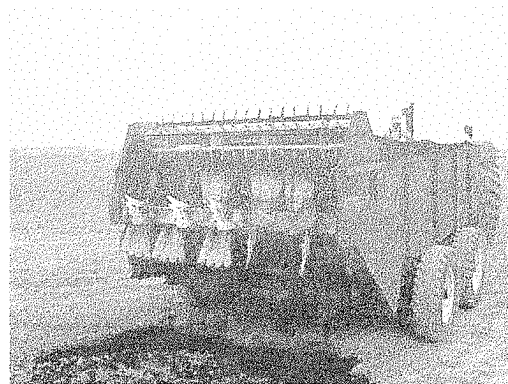


Figura 4.10. Aplicación de fertilizantes y materia orgánica.

Debido al desnivel superficial de las camas conformadas con el rotovactor, se consideró necesario darle una mejor conformación mediante el uso de rastrillos y así obtener un nivel adecuado hacia los bordes.

La plantación fue estructurada en cuatro unidades llamadas repetición o réplica, compuesta las tres primeras de 18 camas cada una, de una longitud promedio de 85 m, la última repetición era de 12 camas, todas espaciadas a 1,40 m. En estas camas o planchas se colocaron las cintas de goteo.

Al extremo sur de la parcela se construyó una zanja drenaje con la finalidad de evacuar los excesos de agua que se produzcan por reparaciones y/o por apertura de las salidas de las cintas de goteo para el proceso de limpieza y lavado y por lluvias. A esta zanja de drenaje le llegaba cada uno de los surcos contruidos entre camas.

En la Figura 4.11 en se presenta la preparación final del terreno antes del transplante.



Figura 4.11. Preparación de tierras y camas conformadas.

4.5.2 Semillero

El proceso de establecimiento del semillero de cebolla se realizó por parte de la Hacienda El Caujaral; es de destacar que el procedimiento utilizado es diferente a lo tradicional del Valle, en este caso la siembra es en camas o planchas de un ancho promedio de 1,4 m y longitudes superiores a los 40 m; el riego es mediante microaspersión y se utiliza la fertirrigación.

Un buen control fitosanitario en semillero garantiza por lo menos un mes sin aplicación de agroquímicos en campo. Antes de proceder con la siguiente actividad del transplante se realiza una poda manual de hojas y raíces a las plántulas con el fin de reducir el área foliar, y así disminuir la tasa transpiratoria en los primeros días después del transplante. En la Figura 4.12 se presentan las características del semillero.



Figura 4.12. Semillero.

4.5.3 Transplante

El material vegetal transplantado fue el Híbrido Americana, el cual estuvo en semillero aproximadamente 50 días, una vez que sale al transplante se practica una poda de las hojas y raíces.

La preparación de las plántulas consistió en acomodarlas en rollos de 500 unidades listas para ser llevada al campo. Existen varias modalidades de transplante, entre ellas cuando el riego se hace por surcos la plántula se coloca sobre los laterales del mismo. Los surcos no deberían ser mayores a 0,15 m de alto y tampoco deben ser tan estrechos, para evitar un pronto secado y para que se mantenga una humedad regular. La otra modalidad de transplante es sobre camas o planchas de siembra con riego localizado, donde la distribución espacial de las plántulas tiene que ser la adecuada, de manera tal que le permita una mejor captación de luz y ventilación a lo largo de la misma. Otro elemento importante de cuidar es la profundidad de transplante en suelos pesados, ya que con profundidades mayores a 5 cm se corre el riesgo de no tener un buen desarrollo del bulbo o convertirse en “chuzo”. La profundidad de transplante en el área de investigación estuvo entre 2 y 3 cm.

Para garantizar la población de plántulas, convenientes para la prueba, se usó una lámina con punzones que dejaban las huellas en el sitio donde deberían ir las plántulas, como se observa en la Figura 4.13.

El transplante se realizó entre los días 14 y 18 de abril de 2004. Las plántulas fueron sembradas sobre la cama, en hileras separadas 15 cm y una distancia entre plantas, en la hilera, de

5 cm; 7,5 cm y 10 cm, obteniéndose una densidad promedio de 860.000; 570.000 y 430.000 plantas / ha respectivamente.



Figura 4.13. Planchas de siembra para garantizar la densidad de plantas y proceso de transplante.

4.5.4 Resiembra

Es necesario, una vez terminada las jornadas de transplante, revisar las áreas de siembras para garantizar que no hayan quedado áreas desprovistas de plántulas. A consecuencia de las precipitaciones un número de plántulas se salieron de los hoyos, obligando a realizar un trabajo de resiembra en toda el área experimental durante los cinco días siguientes al transplante. Se resembró un total de mil plántulas entre las plantas secas y las no sembradas.

4.5.5 Aplicación de riegos de asiento

Para iniciar el proceso de transplante de la cebolla, se consideró que el suelo debe estar a un adecuado contenido de humedad; este nivel de humedad se logró aplicando riegos de asiento. Estos riegos tuvieron como finalidad adicional facilitar el proceso manual de transplante y además lograr una humedad apropiada que no permita la formación de grietas y costras por efectos del clima.

Otro factor que determinó el inicio de los riegos, es lograr una uniformidad de mojado en la cama y que no queden superficies secas dentro de las mismas, para proceder al transplante. El

tiempo que se aplicó agua, antes del transplante, fue elevado ya que el espaciamiento entre goteros no es el adecuado para este tipo de suelos y no se lograba la uniformidad mencionada.

Una vez listas las camas de las dos primeras réplicas, se hicieron aplicaciones diarias de agua fraccionada en tiempos cortos. En la Tabla 4.9 se muestra los registros de los riegos de asiento y en la Figura 4.14 se muestra el proceso

Tabla 4.9. Riegos de asiento.

Fecha	Réplica	Tiempo (min)	Volumen (m³)
07-04-04	I	30	6,90
	I II	30	13,60
08-04-04	I II	30	13,75
	I II	30	12,95
09-04-04	I II	20	9,30
	I II	20	9,50
	I II	20	9,65
10-04-04	I II	20	9,38
	I II	15	6,90
	I II	10	4,70
11-04-04	x	0	0,00
12-04-04	x	0	0,00
13-04-04	III	25	5,95
	I II y III	20	14,10
15-04-04	III IV	20	8,10
16-04-05	III IV	18	7,30
17-04-04	IV	16	2,52
	IV	10	1,75
18-04-04	IV	20	3,49
Sub-Total volumen m ³			139,84

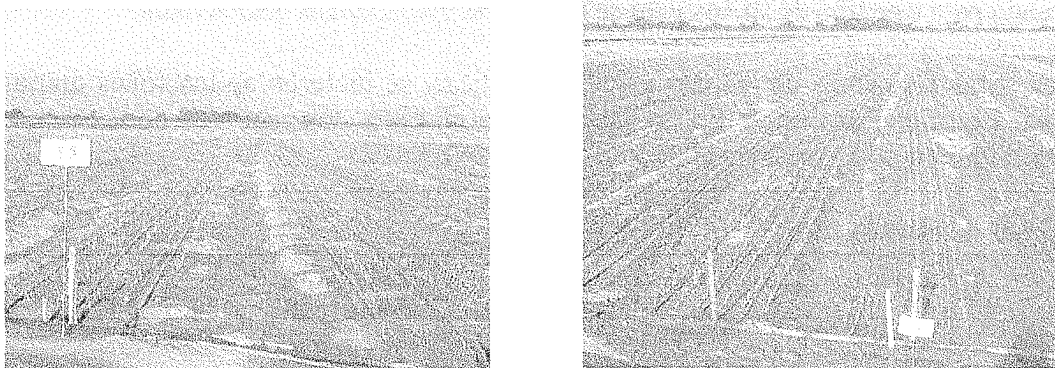


Figura 4.14. Riegos de asiento.

4.6 MONITOREO DEL CULTIVO

4.6.1 Riego del cultivo

Las labores de riego se iniciaron el 14 de abril de 2004 de acuerdo a la estrategia de operación y manejo adoptado para el presente trabajo de investigación, la cual se basa en el conocimiento, en tiempo real, de las variaciones de tensión de agua en el suelo, medida a través de tensiómetros.

Se prestó particular atención a las características propias del suelo (textura pesada y condición salina), debido a la formación de grietas y costras, como resultado de la contracción y expansión de las arcillas. Las grietas ocasionan que el agua se dirija a determinados puntos como escurrimiento, no quedando retenida en el suelo que exploran las raíces y las costras reducen sustancialmente la infiltración superficial.

Las lecturas diarias de los tensiómetros permitieron calcular la cantidad de agua necesaria para reponer el déficit hídrico y el tiempo de riego para una frecuencia diaria; las láminas brutas fueron determinadas a partir de la optimización del modelo de van Genutchen, utilizando una gama de valores de tensiones esperadas, antes del riego y a lo largo del ciclo del cultivo.

Durante las primeras cuatro semanas del cultivo y con la finalidad de asegurar la adaptación de éste, se aplicó riego frecuente para mantener el suelo próximo a capacidad de campo, ajustándose posteriormente de acuerdo a las diferentes fases fenológicas.

4.6.2 Prácticas culturales

La actividad más importante dentro de las prácticas culturales fue el control de malezas, necesaria en el área de cultivo durante su crecimiento. Esta práctica se debe a la presencia activa de otras especies de plantas que compiten con la cebolla. Ya que ésta es un cultivo muy susceptible a la competencia de las hierbas y es importante realizar un buen control químico o manual.

Experiencias de diferentes autores han coincidido en que existen varias razones por las que el cultivo de cebolla no puede competir eficazmente con las malezas. En primer lugar, cuando crecen desde semilla, son más lentas en emerger del suelo dándole oportunidad a las malezas para que se establezcan primero, esto unido a que las semillas son pequeñas y por lo tanto producen plántulas pequeñas, además que las plántulas tienen una tasa relativamente lenta de crecimiento, principalmente en temperaturas bajas.

Se ha observado que las cebollas presentan una baja altura y hábito de crecimiento erguido, además puede decirse que los cultivos bien establecidos de cebolla no compiten muy eficazmente con las malezas, por la luz. Por otro lado las raíces poco profundas y de baja densidad por unidad de volumen, permiten que las malezas puedan obtener el agua y los nutrientes del suelo. En el mismo orden de ideas, el crecimiento de malezas en la etapa final del cultivo no es gran problema para el rendimiento, sin embargo pudiera ser hospedero de insectos indeseados.

La competencia con las malezas acelera la iniciación de la bulbificación si los fotoperíodos, la cantidad y calidad de luz se aproximan a los necesarios para este fin. Por lo tanto, los bulbos se desarrollarán a partir de plantas pequeñas y/o más jóvenes de lo que deberían; además de reducirse el tamaño de las hojas que soportan el crecimiento del bulbo, en comparación con un cultivo libre de malezas, se verán afectados los rendimientos. De no haberse iniciado la bulbificación antes del desmalezamiento, continuará el crecimiento de las hojas con alteración mínima en el proceso de desarrollo.

La práctica cultural de trasplante tiene aspectos positivos adicionales en lo referente al control de malezas. Los cultivos trasplantados se establecen más rápidamente y crecen hasta lograr un tamaño que puede tolerar la competencia con las malas hierbas, inclusive alcanzan rápidamente el tamaño en el que pueden superar los controles químicos de malezas.

4.6.3 Control de plagas y enfermedades

Las aplicaciones y selección de pesticidas para el control de plagas y enfermedades fueron realizadas bajo las recomendaciones profesionales del personal técnico que asiste a la finca y de la pericia del agricultor. Los problemas fitosanitarios encontrados durante las diferentes etapas del cultivo fueron importantes.

En todo el ciclo del cultivo y en todos los tratamientos, se observó la permanencia de bacterias como *Xanthomonas spp.* y *Pseudomonas spp.*, y de hongos como la alta manifestación de la enfermedad fungosa de la mancha marrón, causada por el *Stemphylium vesicarium*, esto se presentó desde 64 al 98 DDT. La fecha de iniciación de la bulbificación se correspondió con el síndrome de bacteriocis. Los controles fueron hechos por medio de aplicaciones alternadas de fungicidas y bactericidas. También hubo presencia de trips o piojitos (*Trips tabaci*), minadores de hojas (*Liriomyza spp.*) y raíz roja (*Phoma terrestris*).

Los controles de protección vegetal fueron continuos durante todo el ciclo, realizándose en total 34 aplicaciones, desde el 26/4/04 (12 DDT) hasta 31/7/04 (108 DDT), debido a la alta presencia de bacteriosis, Figura 4.15, aunado a una alta y frecuente precipitación. La alta densidad de población hizo más eficiente el uso de los agroquímicos.

Los productos más usados fueron: Kocide 2000, Furacin, Curacarb 50 WP, Agrifo-fos 400 y Premier, entre otros. La relación, fechas de aplicación, dosis por hectárea y número de aplicaciones de los diferentes productos se presentan en el Apéndice B.



Figura 4.15. Protección vegetal

La fertilización representa uno de los pilares que permiten acceder a productos de calidad y con rendimientos elevados y sostenidos en el tiempo. El éxito alcanzado en el cultivo de cebolla radica en un manejo integrado de las prácticas culturales tanto durante el cultivo como durante el período de poscosecha, optimizando el ambiente en el que se desarrolla el cultivo.

El riego localizado no es solamente aplicación de agua, es también aplicación multifraccionada de los fertilizantes y es la conjunción de estos dos factores en donde reside la gran ventaja de este sistema, al ser utilizado como vehículo de una dosificación racional de estos productos, ofreciendo la posibilidad de realizar una fertilización día a día, en función del proceso fotosintético y exactamente a la medida de un cultivo, un suelo y un agua de riego determinados y para unas condiciones ambientales definidas.

Una instalación adecuada y parámetros de riego y abonado optimizados, con dosificación de fertilizantes distribuidos durante todos los días del ciclo del cultivo, según las características de la planta, permitirán hacer un uso eficaz de la técnica, haciendo frente a los posibles problemas de contaminación que pueden originarse por un exceso transitorio de fertilizantes en el suelo, mejorando la productividad del cultivo y la calidad de la cosecha, objetivos obligados en el contexto económico actual.

Para conocer el estado nutricional del lugar se recomendó hacer un análisis de suelo previo para poder corregir las deficiencias existentes de macro y micros nutrientes. Dentro de los nutrientes esenciales, el nitrógeno es el elemento que en mayor medida limita el rendimiento del cultivo, en razón de que para sostener niveles elevados de producción es necesario aplicar elevadas dosis, en el orden de 150-200 Kg. de N ha⁻¹, dependiendo del suelo y del ambiente zonal.

La cebolla presenta necesidades de fósforo relativamente altas, este elemento está directamente relacionado con el desarrollo radicular y por lo tanto es necesario para asegurar una absorción eficaz de los restantes nutrientes, siendo por tanto esencial su aporte sobre todo en el inicio del cultivo. Los abonos estabilizadores estimulan la absorción del fósforo por la planta, favoreciendo un desarrollo temprano del cultivo.

La calidad de las cosechas viene determinada en gran parte por el potasio, que confiere resistencia a condiciones ambientales adversas (excesos de precipitación, sequías, entre otros.) y a enfermedades y plagas; una deficiencia de potasio tiene como resultado cebollas más blandas, menos resistentes y por lo tanto de menor capacidad de conservación. La aplicación del potasio en forma de sulfato de potasio, además de las ventajas señaladas, presenta la ventaja de aportar azufre, que la cebolla absorbe en cantidades similares al fósforo ya que tiene altos requerimientos de este nutriente.

Para adaptar la fertilización a las propias condiciones de producción del cultivo, se presenta la Tabla 4.10, que indica las necesidades nutritivas recomendadas por algunos investigadores en relación con el rendimiento de la cebolla.

Tabla 4.10. Rendimientos del cultivo de cebolla en relación a la fertilización.

Cultivo	Producción (Tn ha ⁻¹)	N (Kg)	P ₂ O ₅ (Kg.)	K ₂ O (Kg.)	Mg O (Kg.)
Cebolla	1	4	1,8	5,3	0,5
Estimación	40	160	72	212	20

Es importante tomar en cuenta el tiempo de aplicación adecuada de nitrógeno como fuente vital a través del crecimiento y particularmente durante la bulbificación. El fósforo debe ser aplicado antes de la siembra para un mayor beneficio y el potasio debería ser solamente aplicado si es necesario de acuerdo a la disponibilidad del suelo.

El plan de fertirrigación, que incluye eficiencia, dosis de nutrientes, eficiencia del fertilizante, aporte del suelo y demandas del cultivo, fue diseñado y monitoreado por el Ing. Marcos Rengel de la empresa Agroisleña C.A. La aplicación diaria y el manejo técnico de insumos y equipos fueron realizados por el grupo investigador. Los productos usados durante el programa de fertilización a través del riego fueron Solub 13-40-13, Solub 18-18-18, Humus15, Kumulus, Nitrato de Amonio perlado, Nitrato de Potasio cristalino, Sulfato de Potasio y Ácido Fosfórico para la limpieza de tuberías y cintas de goteo.

La aplicación de los fertilizantes se hizo de manera continua durante varias etapas del cultivo y para medir su influencia en el suelo se determinó la CE, con el objeto de prevenir los peligros de salinización por la aplicación de fertilizantes.

4.7 SEGUIMIENTO DE DISPOSITIVOS DE MUESTREO DE SOLUCION DE SUELO

4.7.1 Captadores de solución

La salinidad también fue medida a través de la extracción de la solución de suelo realizado con un tubo al vacío (Vacutainer) insertado en el dispositivo de captación (*Rhizon sampler*), y al cual se le realizó el análisis salinidad como agua del suelo.

4.7.2 Análisis de la solución del suelo

Los análisis de solución del suelo ayudan a conocer la interacción entre la disolución de nutrimentos aplicada y el suelo o sustrato, verificando pH, C.E. y elementos minerales de interés en general. La proporción o equilibrio químico adecuado en la solución del suelo puede influir en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

La solución del suelo es el intermediario nutritivo entre el suelo y la planta, la composición de la solución del suelo es variable según el tipo de suelo, los elementos nutritivos, el clima y el grado de humedad del suelo. El contenido de elementos minerales presentes en la solución del suelo es de particular interés, puesto que la planta absorbe dichos elementos de ésta, y dependiendo de su concentración en la solución serán más aprovechables por las plantas.

Las mediciones de salinidad del suelo se realizaron mediante análisis de laboratorio de muestras compuestas. Las sales solubles se determinaron mediante la medida de concentración de cationes y aniones a partir de extracto de pasta saturada. Para ello se determinaron la concentración de aniones y cationes, RAS, capacidad de intercambio catiónico CIC y conductividad eléctrica CEe en los estratos ya establecidos. Estos análisis vienen acompañados con las mediciones de pH y porcentaje de saturación en pasta.

Para cuantificar las sales aportadas por el agua de riego se tomó la muestra en las mismas fechas que las de suelo y se evaluaron de igual manera las concentraciones de iones, CE, pH y RAS.

4.8 SALINIDAD Y EQUIPOS DE MEDICIÓN EN EL CAMPO

Como se ha mencionado anteriormente, las sales en cantidades excesivas en el suelo impiden la absorción de agua por las plantas, cambian la absorción de nutrientes y en algunos casos poseen efectos de toxicidad de alguno de los elementos, como por ejemplo el boro. Este microelemento al tener una concentración mayor de $0,75 \text{ me l}^{-1}$ afecta considerablemente la cebolla, Grattan et al. (1993).

Por otro lado los altos contenidos de humedad en el suelo mantienen un bajo nivel de oxígeno, y el oxígeno en el suelo saturado proporciona cambios químicos y bacteriales en el suelo Sifarm (2004), es por ello que el contenido de humedad en el suelo debe ser el óptimo para no provocar afecciones por sales ni reducir los niveles de oxígeno en la rizósfera del cultivo.

El efecto de las sales sobre las plantas se relaciona con el incremento de la energía que estas deben usar para extraer el agua (aumento de la presión osmótica), ya que en los suelos salinos se puede observar buena humedad en el suelo y sin embargo las plantas se someten a marchitamiento. En tal sentido las plantas pueden ajustar su metabolismo y sobrevivir en suelos salinos, pero a cambio de una reducción de su crecimiento y cosecha, por otro lado las plantas al poseer un sistema radicular mayor su habilidad para obtener agua y nutrientes es también mayor. Navarro (2002).

La salinidad del suelo se determinó mediante la medición de la conductividad eléctrica con una sonda electromagnética y un conductivímetro, los cuales incorporan la corrección por efecto de temperatura. A estos equipos se les construyó una curva de calibración con datos medidos en campo y llevados a laboratorio.

4.8.1 Calibración de los equipos de medición de CE en campo

Una de las formas para determinar la salinidad en campo es el basado en el principio de medición de resistividad del suelo el cual ha sido descrito por Rhoades y van Shilfgaader (1976), en un arreglo de cuatro electrodos. El principio de funcionamiento es el siguiente: los electrodos externos actúan como electrodos de corriente y los internos actúan como potencial, el circuito consiste en una fuente de corriente suministrada por el medidor de resistividad a tierra. Los electrodos miden la diferencia de potencial que ocurre cuando atraviesa un flujo de corriente en un volumen del suelo.

La sonda electromagnética es un equipo para medir la conductividad eléctrica como parámetro para determinar la salinidad en los suelos, consiste en una sonda electromagnética, un

medidor de resistividad a tierra y una barra de acero, que puede medir hasta una profundidad de 1,10 m.

Para el uso de la sonda es necesario conocer que las medidas de las concentraciones de sales dependen de la cantidad de sales y el contenido de humedad del suelo, los contenidos de sales puede ser cuantificado como la concentración de sales disueltas expresada en términos de $g\ l^{-1}$ o ppm, y la conductividad eléctrica (CE) en unidades de $dS\ m^{-1}$ o $mmhos\ cm^{-1}$. La conductividad eléctrica del suelo depende de la cantidad total de sales del suelo, el tipo de sal, contenido de humedad y la temperatura, y adicional a esto las características del suelo como son la estructura y la textura del suelo. Eijkelkamp (1999). A continuación se describe cada uno de ellos.

1. Contenidos de humedad, los suelos completamente secos no conducen electricidad y esto esta fuera de relevancia ya que las plantas tampoco pueden absorber los iones no disueltos. Un nivel bajo de humedad es correlacionado con un alto nivel de la concentración de sales y un incremento del contenido de humedad decrece la concentración de sales y consecuentemente la conductividad eléctrica del suelo.
2. Un incremento de los contenidos de sales en la solución de suelo causa un incremento en el número de iones y a su vez la conductividad eléctrica sube, aunque su relación no es lineal.
3. Tipo de sales, principalmente los siguientes iones sodio, potasio, calcio, magnesio, amonio, cloruro, sulfato, bicarbonatos y nitrato condicionan la conductividad de la humedad en el suelo, el tipo de valencia univalente, bivalente o trivalente tiene un efecto diferente en la conductividad. El diámetro de los iones, su longitud afecta su movilidad y consecuentemente baja los niveles de CE.
4. Temperatura, un incremento en la temperatura por ejemplo incrementa la energía cinética de los iones y consecuentemente un aumento de la Conductividad Eléctrica.

4.8.2 Características del equipo

La sonda mide 20 cm, y termina en una punta de forma cónica para una fácil penetración en el suelo, su diámetro decrece desde los 30 mm en la cabeza hasta los 28 mm en su base. La sonda costa de cuatro anillos (electrodos) espaciados uno de otro a 25 mm. Los electrodos están separados por anillos sellados y un anillo de aislamiento. Los electrodos externos son de corriente y los internos son de medición. La punta del electrodo tiene la forma de cono y es un sensor de temperatura. Los cables salen de la parte superior de la sonda y las conexiones se instalan al medidor de resistividad a tierra. Todos los electrodos están conectados a un cableado como se muestra en la Tabla 4.11

Tabla 4.11. Identificación de los electrodos de la sonda electromagnética.

Electrodo N°	Color del cable
6	Verde
7	Blanco
8	Marrón
9	Amarillo

4.8.3 Medidor de resistividad a tierra

Este equipo es a prueba de agua y de cortes de energía en el panel de control, por razones de seguridad posee un fusible de 0,1 A-250 V. En el panel de control hay cuatro puntos conectados a la sonda que se une con dos puentes de metal, para realizar la medición se pulsa el botón y el valor se muestra en la pantalla digital. El equipo tiene cinco verificadores de su funcionamiento los cuales se muestran en la Tabla 4.12

Tabla 4.12. Indicadores de fallas en el medidor de resistividad a tierra.

Indicador	Significado
LO bat	Batería baja
(-)	Dirección opuesta de la corriente.
Luz E-H	Falla en el circuito E-H
Luz Es-S	Falla en medición circuito Es-S
Luz Es-S NOISE	Interferencia en medición circuito Es-S.

4.8.4 Metodología para el uso del equipo

La medición con el medidor de resistividad a tierra, usa cuatro electrodos basados en el método Wenner aplicado por Rhoades y Van Schilfgaarde (1976) citado por Eijkelkamp (1999), para el desarrollo de un equipo de medir la conductividad eléctrica.

El medidor de resistividad a tierra genera una corriente alterna entre los dos electrodos de corriente por el medio de ellos se crea un campo eléctrico. Su resistencia depende de la fuerza de la corriente y la distancia entre cuatro electrodos. La resistividad del suelo causa una disminución del voltaje entre la corriente de los electrodos, el medidor de resistividad a tierra mide un diferencial de potencial entre los medidores. El cociente de la diferencia de potencial registrado y la resistencia de la corriente es igual a la resistividad. La resistividad del suelo se establece en un volumen elíptico de 80 cm³.

Ya que la conductividad eléctrica está influenciada por la temperatura, la sonda posee un sensor para determinar el factor de corrección. La resistividad es transformada en conductividad

eléctrica y si es necesario en resistividad del suelo, usando una constante empírica o “constante de celda” que está determinada por la distancia entre ellos y la forma del electrodo. Este valor obtenido también puede ser convertido a conductividad eléctrica estándar CEe a través de una curva de calibración. La curva de calibración es construida mediante la CE suelo medida con la sonda en varios puntos de muestreo en campo y analizando la muestra extraída en laboratorio mediante la metodología de extracto de pasta saturada.

4.8.5 Uso de la sonda electromagnética

Para el uso de la sonda se necesita que las mediciones de salinidad sean hechas a un mismo contenido de humedad. La distancia entre los electrodos es de 25 mm, las medidas se hacen dentro de un intervalo de 15 cm. que facilita la medición de cada capa del suelo. Si se determina la CEs en un volumen de suelo más pequeño que el establecido por el equipo las líneas de energía se cortan y afectan la lectura.

Por otra parte la relación que existe entre la concentración del ion y la conductividad eléctrica no es lineal por esta razón los valores de CE no pueden ser comparados al azar.

4.8.6 Medición de resistividad del suelo

- En el sitio de muestreo se abre un hoyo con el barreno.
- Se introduce la sonda en el hoyo, sintiendo algo de resistencia, no se debe girar, y para mayor eficiencia del uso debe estar rodeada con el suelo e inmediatamente se ajusta con el factor de temperatura
- Los puntos de poder se conectan como se muestra en la siguiente Tabla 4.13.
- Una vez conectados los puntos de poder se pulsa el botón de lectura y el valor se muestra en la pantalla digital, se puede verificar la lectura repitiendo la medición.
- Inmediatamente se determina el factor de corrección por temperatura.

Para medir el factor de corrección por temperatura se sigue los pasos siguientes:

- Se remueven todas las conexiones de los puntos de poder del medidor de resistividad del suelo.
- Se reemplaza las conexiones entre los puntos de poder E-ES y S-H.
- Se conectan los puntos de poder amarillo y gris.
- Pulse el valor de medición y el factor se mostrara en la pantalla, este valor se debe dividir por 1.000 para obtener el factor de corrección deseado.

Tabla 4.13. Conexiones de los puntos de poder para realizar lecturas de resistividad.

Color del Cable	Puntos de poder
Amarillo	E
Marrón	ES
Blanco	S
Verde	H
Gris	S (Sin conexión)

Tabla 4.14. Conexiones para determinar el factor de corrección por temperatura.

Color del Cable	Punto de poder
Amarillo	ES
Gris	S

4.8.7 Cálculo de la conductividad eléctrica y resistividad del suelo

Para determinar el valor de la conductividad eléctrica del suelo se usa la siguiente ecuación del equipo.

$$EC_s = \frac{K \times ft}{R_t} \quad (4.5)$$

donde:

ECs es la conductividad eléctrica del suelo en $dS\ m^{-1}$ a 25 °C.

K es la constante empírica o “constante de celda” cm^{-1} , para el equipo es 19,5 cm^{-1} .

ft es el factor de corrección por efecto de temperatura de la medición de CEs a 25 °C.

Rt medición de resistividad del suelo en ohm. (Ω)

Si es necesario calcular la resistividad del suelo se calcula mediante el inverso de CEs ($1/CEs$).

4.8.8 Determinación de la curva de calibración

La CEs depende de la estructura y textura del suelo, del contenido de humedad y el contenido de sales en el suelo húmedo. Una vez obtenido el valor de CEs mediante el uso de la sonda electromagnética se transforma a CEe basado en la curva de calibración del equipo como se muestra en la Figura 4.16.

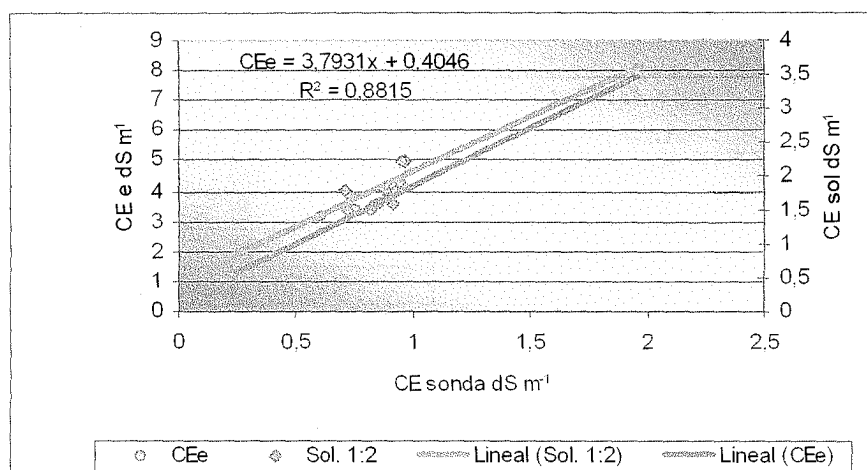


Figura 4.16. Curva de calibración de la sonda electromagnética.

Es de suma importancia realizar las mediciones a un valor igual de contenido de humedad una curva de calibración debería ser construida para cada tipo de suelo. Van Hoorn (1980). El procedimiento para realizar la curva de calibración es de la siguiente manera:

- ✓ Con el barreno se hace un agujero en el punto donde se va a realizar la medición. Se conserva la muestra para ser analizada posteriormente.
- ✓ Con la sonda se determina la CE_s en varios puntos del suelo con el fin de obtener el mayor número de puntos.
- ✓ Las muestras de suelo se analizan en extracto de pasta saturada y si es necesario se puede construir una curva para solución 1:2.
- ✓ Una vez obtenidos los puntos por las distintas metodologías se dibujan, la CE_s en el eje de las abscisas, y en el eje de las ordenadas la CE_e; mediante un ajuste lineal se estima su ecuación.

4.8.9 Aplicaciones del equipo

El medidor de resistividad del suelo es aplicado para determinar la CE del suelo hasta una profundidad de 1,10 m. Esta sonda puede ser utilizada para el monitoreo de la salinidad en la agrimensura de suelos salinos en las siguientes áreas de investigación.

- ✓ Problemas de salinización de suelos bajo riego.
- ✓ Calidad de aguas subterráneas en hidrogeología.
- ✓ Investigación de salinización en preservación natural.
- ✓ Tasación de suelos para varios tipos de cultivos.
- ✓ Medición de salinización por la aplicación de estiércol con contenidos de sales en su composición química, entre otros importantes usos.

El otro equipo de medición de resistividad del suelo es el *Moisture soil and temperature*, al cual se le determinó una curva de calibración para convertir las mediciones de conductividad eléctrica obtenidas en campo a valores de CE del suelo en extracto 1:2, el procedimiento fue muy similar a la hecha para la sonda electromagnética.

Se realizó las soluciones de suelo en relación 1:2 y se midieron con el medidor de resistividad del suelo para la resistencia 1K y 10K. Este equipo posee un medidor de temperatura, la cual se utiliza para corregir los valores mediante un factor de ajuste. Estas mismas soluciones se midieron en laboratorio y una vez obtenidos los puntos se dibujaron y ajustaron con una regresión lineal como se muestra en la Figura 4.17.

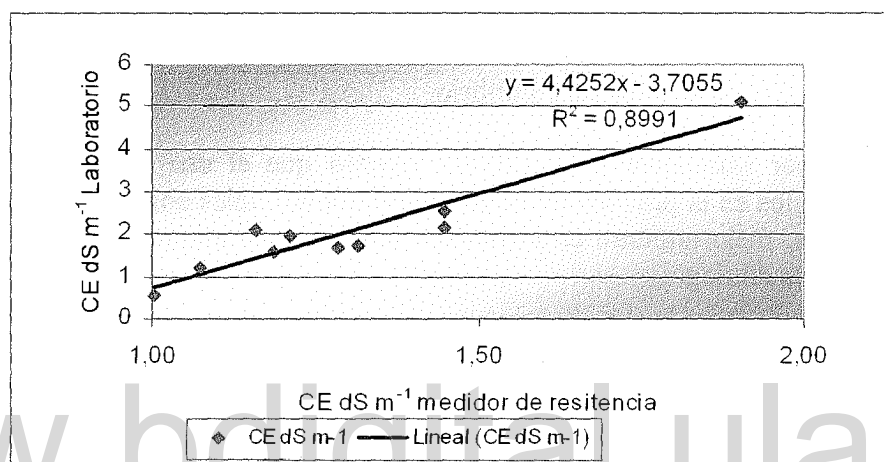


Figura 4.17 Curva de calibración del medidor de resistividad de suelo

4.9 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE RAÍCES

El volumen mojado de suelo en riego por goteo es menor comparado con otros riegos, las raíces al tener un volumen de agua en el suelo constantemente húmedo no exploran más allá. Además la cebolla posee un sistema radicular poco profundo si se compara con otras hortalizas. Por otro lado, tampoco posee pelos absorbentes ya que, sus raíces son adventicias es por ello que se llevó a cabo la medición de la densidad de raíces en un punto intermedio entre la cebolla y el gotero. Una vez conocido el volumen de suelo muestreado y midiendo la longitud de las raíces que ocupaban dicho volumen, se determinó la relación entre la longitud de raíces y el volumen de suelo, lo cual se conoce como densidad de raíces lo cual se expresa en cm/cm^3 .

4.10 MUESTREO DE TEJIDO

A los 30 días después de transplante se inició los muestreos periódicos con fines de realizar los análisis de tejido. Esto se hizo para las distintas etapas fenológicas de cultivo. La muestra fue

de 10 plantas por tratamiento, las cuales se separaron en hojas y bulbo. Una vez separada se pesaron para obtener su peso húmedo; luego se colocaron en una estufa a 70 °C por un lapso de dos a tres días con la finalidad de estimar la materia seca.

Se elaboró una curva de crecimiento para la cebolla. También se midieron otros parámetros, como fueron diámetro del bulbo, diámetro del cuello, área foliar y número de hojas.

4.11 DINÁMICA DE SALES

La influencia del agua de riego en la composición de la solución del suelo y su concentración puede dividirse en dos fases, la de tránsito y la fase de equilibrio. La fase de tránsito es aquella en donde la concentración hídrica del suelo es cambiante y las reacciones ocurren más rápidos que en la etapa de equilibrio.

Oster citado por Mmolawa y Or (2000), reportó que el uso del agua de poca calidad requiere de unos ajustes en la práctica de riego convencional, tales como la selección de cultivos tolerantes a las sales, mejoramiento en el manejo hídrico y en algunos casos, la adaptación de tecnologías avanzadas de riego.

Durante la infiltración, los contenidos hídricos del suelo cambian espacial y temporalmente. Estas fluctuaciones afectan las concentraciones y composición de la solución de suelo, así como también influye en las subsecuentes distribuciones de los solutos en el perfil del suelo. Algunos solutos reaccionan con la matriz del suelo a manera de que ellos viajan a través del mismo, resultando en disolución y precipitación fuera y dentro de la solución hídrica del suelo. Las variaciones en movilidad y reacciones de los solutos resultan en una distribución diferente de los solutos. Por ejemplo, los nitratos son transportados principalmente por la convección de la fuente de agua mientras que, los menos móviles, los fosfatos son transportados por la difusión y así sus subsecuentes distribuciones en el suelo serán diferentes.

Para observar el dinamismo que ocurre en el suelo se evaluó por periodos continuos la conductividad eléctrica, medida con los aparatos descritos anteriormente, (Medidores de resistividad del suelo). Estos seguimientos se hicieron en varias etapas del cultivo con las siguientes actividades.

- ✓ Evaluación de la salinidad antes y después del riego sobre una cama de siembra.
- ✓ Evaluación periódica para observar la dinámica de las sales en las etapas de crecimiento, desarrollo y maduración.
- ✓ Determinación de la salinidad del suelo por tratamientos.
- ✓ Evaluación temporal y espacial de la salinidad.
- ✓ Medición de la salinidad en el bulbo húmedo.
- ✓ Evaluación de la salinidad en riego tradicional antes y después del riego en el perfil del surco.

4.11.1 Evaluación de la salinidad antes y después del riego sobre una cama de siembra

En la fecha del 25 al 26 julio, se realizaron las evaluaciones para observar el comportamiento de la salinidad en el perfil del suelo en un lapso de 24 horas. Para ello se determinó la CE a una profundidad de 40 cm dos horas antes y dos horas después del riego. A las 24 horas de haberse aplicado el riego se repitió la medición. De igual manera y a la misma profundidad se determinó el contenido de humedad gravimétrico con el fin de realizar las isolíneas de humedad en el suelo para la evaluación y mostrar la relación que tiene con respecto a la salinidad. En la Figura 4.19 se muestra gráficamente como se realizó el muestreo.

4.11.2 Evaluación periódica para observar la dinámica de las sales en las etapas de crecimiento, desarrollo y maduración

Con el objeto de determinar la salinidad en las distintas etapas del cultivo se establecieron evaluaciones periódicas, a dos profundidades de muestreo 0-15 cm y 15-30 cm. Estas evaluaciones se realizaron antes del fertirriego o solamente del riego. De esta manera se evaluó el movimiento de las sales de manera continua en una sección transversal de la cama como se muestra en la Figura 4.18 y poder establecer la influencia de los fertilizantes sobre los valores de conductividad eléctrica y su efecto sobre el cultivo.

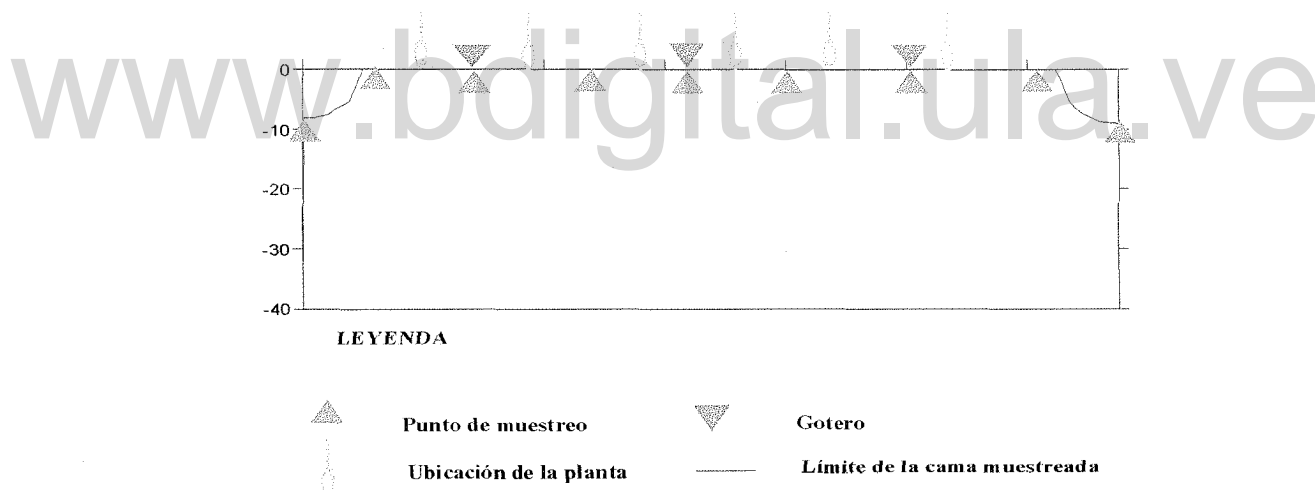


Figura 4.18 Diagrama de muestreo sobre la cama

4.11.3 Determinación de la salinidad del suelo por tratamientos

La conductividad eléctrica en las distintas etapas del cultivo se determinó en varios puntos de la cama central de los tratamientos, las profundidades muestreadas fueron de 0-5 cm, 5-10 cm y 10-15 cm, las cuales fueron analizadas en el laboratorio en solución 1:2. Para ello se tomaron

seis muestras por cama con la finalidad de tener un promedio del valor de CEs. Con la finalidad de observar el comportamiento de la sonda y poder extrapolar a extracto de pasta saturada mediante las ecuaciones de calibración se tomaron las muestras y se analizaron en el laboratorio aplicando la metodología seguida para determinar la salinidad en el suelo. Las evaluaciones fueron hechas a los 55, 64, 72, 75, 82, 108 y 121 días después del transplante respectivamente.

4.11.4 Evaluación temporal y espacial de la salinidad

La evaluación se inició el 12 de mayo, repitiéndose consecutivamente cada quince días en varios puntos de la parcela, con la finalidad obtener una cuadrícula para representar la conductividad eléctrica mediante isolíneas de salinidad, dicha representación se realizó basado en el uso el Software Surfer 8, de esta manera se puede observar y graficar la distribución de el movimiento de las sales en la parcela.

4.11.5 Medición de la salinidad en el bulbo húmedo

Una vez que la etapa del cultivo se encontraba en la fase de maduración se construyeron dos calicata, un perfil longitudinal y otro transversal en dos sitios de la parcela experimental, donde se observó el perfil de humedecimiento y se construyó una malla de 10x10 cm, con la finalidad de tomar muestras de suelo que permitieran determinar la conductividad eléctrica en solución 1:2. Estos valores se representaron en isolíneas de CE para observar su distribución en el perfil del suelo. Dichas mediciones de salinidad se realizaron con el *meter soil and temperature* una vez calibrado.

4.11.6 Evaluación de la salinidad en surco de riego tradicional antes y después del riego

Con la finalidad de comparar la dinámica de las sales en el perfil del suelo para distintos escenarios de siembra se realizó la medición de la CE en el riego tradicional en un perfil del suelo. Para ello, se ubicaron dos surcos donde se midieron los parámetros de Contenidos de humedad y CE antes y después del riego. La evaluación se realizó una vez que el agua del riego no se observaba físicamente sobre el surco. Los puntos de muestreo se ubicaron en el fondo del surco, entre plantas y en el borde superior.

4.12 MODELO LEACHM

La salinización secundaria generalmente se produce por el riego con aguas de baja calidad, por Fertirrigación, por ascenso capilar o por la falta de un adecuado drenaje. Ayer y Wescot (1985).

La problemática de los suelos salinos es conocida desde hace mucho tiempo pero fue a finales del siglo XIX, principios del siglo XX que fue conceptualizado por Hilgar, De Sigmond, entre otros. Pero en el año 1954 en el documento de “*Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soil*”, publicado por *U.S. Salinity Laboratory of Riverside*, que se establece las base teóricas y prácticas para el diagnóstico y para el asesoramiento acerca de cómo manejar estos suelos, Porta et al. (1999).

El modelo LEACHM, es un modelo de investigación que describe el régimen hídrico utilizando un sofisticado algoritmo para describir el movimiento del agua, la química y el transporte de solutos en suelos insaturados o parcialmente saturados con profundidad hasta de dos metros Hutson y Wagenet (1992) y sus siglas significan *Leaching Estimation And Chemistry Model*, este modelo fue desarrollado por Hutson y Wagenet (1992). En él se consideran algunos procesos que se presentan en el suelo, el cultivo y la atmósfera, los cuales participan en el desarrollo de los procesos de transporte de agua y solutos, la adsorción iónica, la especiación química y los procesos de transpiración de los cultivos y la transpiración.

Las características más relevantes para usar este modelo son:

- ✓ Es un modelo calibrado y validado en numerosas ocasiones y ampliamente aceptado por la comunidad científica.
- ✓ El transporte de agua en el suelo se determina mediante la ecuación de Richards y la ecuación de convección-dispersión para el transporte de solutos.
- ✓ Posee un código abierto el cual permite modificar ecuaciones y rutinas pudiéndose calibrar para distintas zonas.
- ✓ Permite que se pueda incorporar las rutinas de nutrientes y pesticidas.

Para su uso se tiene que tomar en consideración:

- La ecuación de Richards no considera la fracción gruesa, viéndose afectado el cálculo de la permeabilidad y del flujo de agua en suelos con abundante fragmento grueso.
- Cuando existen variaciones de la humedad entre los periodos secos y húmedos y por floculaciones freáticas la ecuación de Richards no se ajusta muy bien.
- En suelos con macroporosidades y/o flujo a través de los canales no es simulado por LEACHM
- LEACHM trabaja por medio de rutinas de manera que el error pasa de una rutina a la otra.
- Cuando el suelo esta saturado se tiene que registrar el potencial hídrico con valor mayor a -0.2 Kpa.
- La influencia de los laterales no se considera en el modelo de este tipo unidimensional.

El modelo progresa a partir del nodo superior hacia los nodos inferiores, pero cuando las variables cambian en función del tiempo y la profundidad el procedimiento de cálculo es más largo y dependerá del número de nodos y de los intervalos de tiempo definidos, Battles-Sales y Hurtado 2002. De esta manera, para determinar las condiciones en los nodos y establecer los flujos de masa y energía, es importante definir los límites superior e inferior.

Una de las ventajas de los modelos numéricos que usan elementos finitos es que se puede dividir el perfil de suelo en polígonos o celdas. Los valores que se encuentran dentro de la celda se determinan por interpolación entre los puntos de los nodos.

Por otra parte los modelos 1-D son los más utilizados y desarrollados, estos determinan en su desarrollo una única salida del conjunto de datos de entrada.

Las entradas necesarias para el modelo LEACHM 1D, son las concentraciones de los iones Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio Sulfato y Cloruro, Alcalinidad (Carbonatos y Bicarbonatos), Contenido de humedad en el suelo, Presión parcial de CO_2 .

Que aunado con otros registros como son cantidad de fertilizantes volumen de agua aplicado, clima evaporación y precipitación, entre otros, para predecir el problema de salinidad bajo el manejo del riego y de esta manera predecir los efectos de la salinidad.

4.12.1 Generalidades del modelo LEACHM

Los edafólogos buscan la manera de organizar la información en modelos de muy sencillo hasta con cierto grado de complejidad, estos modelos incluyen mapas representativos de la distribución de los suelos, algunos de ellos relacionan los factores medioambientales con la génesis de los suelos y modelos que simulan los procesos de formación de los suelos. La necesidad de organizar la información de suelos en modelos tiene el objetivo de conocer el suelo y predecir las consecuencias de la actividad humana sobre ellos.

Algunos pioneros de desarrollo de modelo fueron Dokuchaev y Hilgard propusieron el primer modelo multifactorial de génesis del suelo. En 1882, Dokuchaev presentó una ecuación que relacionaba el clima con el suelo, la vegetación y los organismos, el material geológico y la edad relativa del suelo. En 1941, Jenny publicó otra ecuación en la que añadía el factor de topografía, la edad absoluta del suelo y una serie de factores adimensionales no especificados. Estos factores no fueron presentados por Jenny como factores formadores de suelos sino como factores que definían el estado del sistema suelo. Posteriormente Jenny amplió la base científica de la ecuación de la forma de los suelos usando un análisis aproximado.

4.12.2 Selección del modelo

El modelo seleccionado ha sido el modelo LEACHM desarrollado por Hutson y Wagenet (1992). El modelo LEACHM considera algunos procesos que suceden en el sistema suelo-planta-atmósfera, destacando los procesos de transporte de agua y solutos, la absorción iónica, la especiación química la evaporación y la transpiración del cultivo.

La selección del modelo se basó en la amplia aceptación de la comunidad científica por haber sido calibrado y validado en numerosas ocasiones. Este modelo utiliza la ecuación de

Richards para transporte de agua y la ecuación de convección-dispersión para transporte de solutos utilizando el cálculo numérico diferencial mediante aproximaciones algebraicas. Es de acotar que también permite introducir modificaciones en las ecuaciones y rutinas calibrando el modelo para cada zona de estudio. Además permite la incorporación de las rutinas de nutrientes y pesticidas.

Este modelo tiene algunas limitaciones como por ejemplo, la ecuación de Richards no tiene en cuenta la fracción gruesa. Esto puede influir en el cálculo de la permeabilidad y del flujo del agua sobre todo el suelo con abundante fragmentos gruesos. Esta ecuación no considera el fenómeno de histéresis que se produce por las variaciones de la humedad entre los periodos secos y periodos húmedos y por las fluctuaciones de la capa freática Hurtado y Batle Sales (2003). Tampoco simula el flujo preferencial del agua que puede ocurrir a través de canales y las macro porosidades (*bypass-flow*).

El Modelo LEACHM está constituido por una sucesión de modelos (rutinas) de manera que los errores pasan de una rutina a otra y así sucesivamente.

El modelo no representa adecuadamente las condiciones de saturación. Los valores de potencial entre 0 y $-0,02$ kPa no se consideran, debido a que se producen errores de cálculo de modo que en perfiles saturados, cuando el potencial es cero, se utiliza el valor de $-0,02$ kPa.

Al ser un modelo unidimensional no tiene en cuenta las influencias laterales que pueden afectar en los resultados. La Figura 4.19, se describe los procesos y reacciones que tiene en cuenta el modelo.

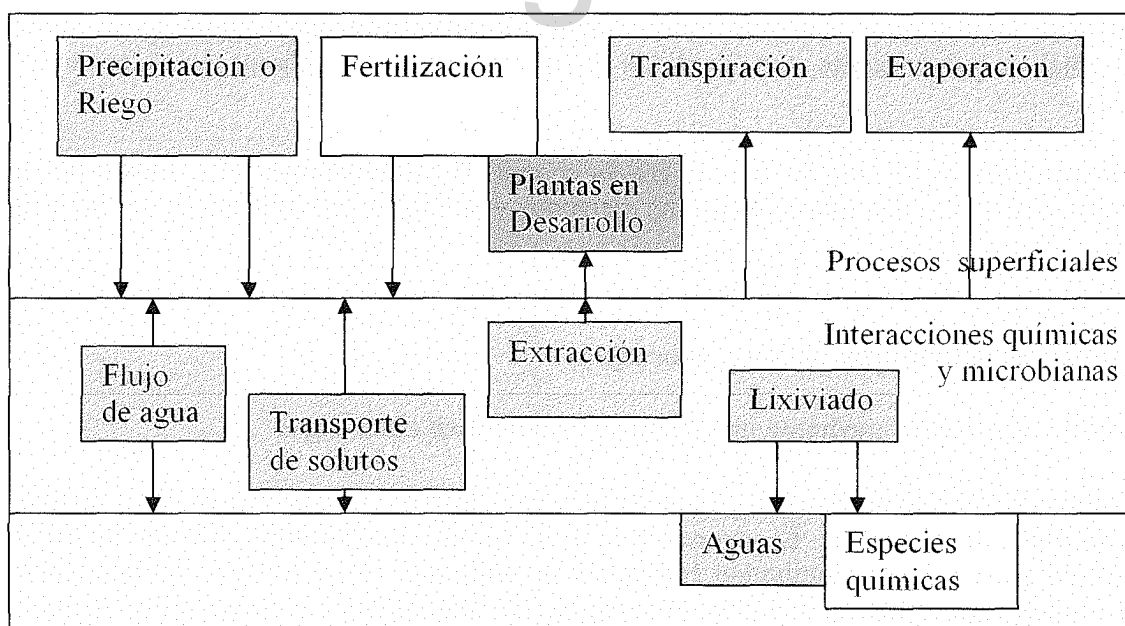


Figura 4.19 Procesos que se toman en cuenta en el modelo LEACHM.

Otra limitante del modelo es que no se puede utilizar para:

- ✓ Simular el crecimiento y producción de la cosecha ni para la respuesta de las plantas al suelo o condiciones climáticas. Las plantas se representan en el modelo únicamente para estimar la transpiración y la dinámica de los nutrientes;
- ✓ Describir la escorrentía superficial y la erosión debido a que cualquier estimación de la transferencia de las especies químicas al agua superficial en índice y asunciones subjetivas;
- ✓ Explicar los efectos de los flujos regionales, superficiales y subterráneos.

Los modelos determinísticos disponibles se han usado en la investigación retrasando su utilización en la gestión agrícola hasta que sean probados y verificados bajo condiciones de campo. La disponibilidad de ordenadores y el reconocimiento de la complejidad de los sistemas agua suelo planta han acelerado la demanda por parte de los profesionales de la comunidad agrícola.

4.12.3 Fichero de entrada

Todos los datos necesarios de entrada para el modelo LEACHM están contenidos en un único fichero que puede ser editado mediante un editor de fichero ASCIL. Este fichero de entrada no tiene extensión y los archivos de salida se denominan con el mismo nombre que el fichero de entrada más una extensión.

La ventaja de la existencia de un único fichero está en que todos los datos están organizados para ser usados en la simulación y el fichero puede ser copiado, renombrado, editado y copiado total o parcialmente con facilidad para crear nuevos ficheros y rodar nuevas simulaciones.

Las desventajas es el tamaño del fichero es cuando las simulaciones se extiende por un largo periodo ya que se tienen que procesar los datos de evaporación y precipitación por periodos más largos.

4.12.4 Estructuras del modelo, rutina y subrutinas

El modelo se organiza mediante módulos que se describen como sigue:

Las rutinas y subrutinas están organizadas en varios grupos. El primero de ellos contiene las rutinas de inicio del programa. El segundo grupo, las rutinas que permiten calcular las curvas de retención de agua y la conductividad hidráulica no saturada. En el tercero, se agrupan las rutinas relacionadas con el cálculo de la evapotranspiración del cultivo. Un cuarto grupo reúne las rutinas relacionadas con el cálculo de la escorrentía. Y por último, el quinto agrupa las rutinas relacionadas con el transporte de agua y solutos, Batle Sales y Hurtado (2002)

4.12.5 Inicio del programa

Es una rutina para el inicio del programa, revisa y confirma los datos del fichero de entrada y verifica que los valores se correspondan a las especificaciones del modelo.

Leachc: verifica la conformidad de los datos con las especificaciones del usuario

Mainc: revisa las especificaciones del usuario respecto a la impresión de los archivos de salida.

Readc: procede a la lectura de los datos y de valores límites especificados por el usuario.

4.12.6 Curvas de retención y conductividad hidráulica no saturada

Retfun: es la rutina que determina la retención del agua y la conductividad hidráulica no saturada utilizando las ecuaciones de Campbell. Esta ecuación relaciona la fracción de contenido de agua volumétrica (θ), el potencial de presión (h) y la conductividad hidráulica (K) requeridas en el modelo de flujo de agua.

La ecuación de retención de agua de Campbell es la siguiente:

$$h = a(\theta/\theta_s)^{-b} \quad (4.6)$$

Donde θ_s , es el contenido de agua en saturación y (a , b) son constantes.

Para evitar la discontinuidad que se presenta cuando $h = a$ y $\theta/\theta_s = 1$ se cambia esta ecuación a una función parabólica a potenciales elevados. Huston y Cass, citado por Beatle Sales y Hurtado (2002), modificaron la ecuación de Campbell definiendo una sección parabólica expresada en los términos de las constantes a y b para los potenciales de presión entre cero y h_c .

$$h = [a(1-\theta/\theta_s)^{1/2}(\theta_c/\theta_s)^{-b}]/[1-\theta_c/\theta_s]^{1/2} \quad (4.7)$$

h_c y θ_c es el punto de intersección entre las dos funciones:

$$h_c = a[2b/(1+2b)]^{-b} \quad (4.8)$$

$$\theta_c = 2b\theta_s/(1+2b) \quad (4.9)$$

La curva de retención de agua es sigmoidal y continua. Aplicando la ecuación de Campbell se obtiene la ecuación de conductividad:

$$K(\theta) = K_s(\theta/\theta_s)^{2b+2+p} \quad (4.10)$$

Donde $K(\theta)$ es la conductividad hidráulica (mm/día) para un determinado contenido de agua θ , K_s es la conductividad hidráulica en saturación θ_s y p es un parámetro de interacción de poros que generalmente, tiene el valor de la unidad.

Existen dos vías posibles de ejecución del fichero que depende de si los parámetros de Campbell son o no conocidos. En caso de que se conozcan los valores, se optará por el modelo de retención 0 y se escribirán dichos parámetros en el fichero de entrada; durante la ejecución se saltará la rutina Retpred.

Retpred: se utiliza para estimar las curvas de retención cuando no se conocen los parámetros de Campbell. Batle Sales y Hurtado (2003), exponen que las ecuaciones de edafotransferencia se utilizan para predecir la retención del agua a partir de la distribución granulométrica, la densidad aparente y el contenido de materia orgánica.

Watdat: a partir de los parámetros de retención especificados en el fichero de entrada o la estimación a partir de las funciones de edafotransferencia, se calcula y se imprime en el fichero de salida (*.out) el contenido de humedad (θ) y la conductividad hidráulica para un rango de potencial matricial que depende del modelo de retención seleccionado.

4.12.7 Evapotranspiración y cultivo

Growth: permite el cálculo del crecimiento y distribución de las raíces, así como de la cobertura de los cultivos, utilizando ecuaciones empíricas, los resultados se usan en otra rutina para el cálculo de evapotranspiración. (rutina Potet) y la absorción del agua por las plantas (rutina Wuptak).

La simulación del crecimiento de los cultivos representa exclusivamente la distribución de las raíces y la cobertura en función del tiempo y la profundidad, no teniendo en cuenta las relaciones entre las condiciones del suelo y el cultivo ya que LEACHM no pretende ser un modelo de crecimiento. El modelo permite seleccionar entre tres opciones (a) no existencia de vegetación, (b) distribución constante de raíces y cobertura y (c) cultivos en crecimiento. En el primer y segundo caso la rutina Growth se omite.

La ecuación usada para simular el crecimiento de las raíces está basada en el modelo de Davidson et al. (1978), citado por Hurtado y Beatle Sales (2003), su experimento se realizó con maíz durante un periodo de 113 días, estas ecuaciones predicen que en la madurez las raíces se desarrollan hasta una profundidad de 1,3 m. El modelo, tomando en cuenta esto, introduce una modificación adicional mediante un factor de profundidad radicular relativa a las ecuaciones de Davidson que amplía o comprime la distribución de raíces.

El incremento de la fracción de cobertura con el tiempo se describe mediante una curva empírica sigmoideal. Childs, (1975) citado por Beatle Sales y Hurtado (2002).

$$\text{Cobertura} = \text{Cobertura en la madurez} / [1 + \exp^{(6 - (12t1/12))}] \quad (4.11)$$

Potet: las rutinas de evapotranspiración están basadas en los métodos de Childs y Hanks (1975), citado por Hurtado y Beatle Sales (2003). A partir de la fecha de inicio de la simulación se calcula la evapotranspiración diaria (Etd) utilizando la evaporación semanal (Ets) introducida en el fichero de entrada y un factor del cultivo (fc) según la ecuación:

$$Etd = (fc * Ets) / 7 \quad (4.12)$$

La transpiración potencial diaria (Td) se calcula multiplicando la Etd por la fracción de cobertura (fcb).

$$Td = Etd * fcb \quad (4.13)$$

Por último la superficie potencial de evaporación (Ep) se calcula como diferencia entre la evapotranspiración potencial y la transpiración potencial.

$$Ed = Etd - Td \quad (4.14)$$

Cult: representa los efectos de mezcla en la zona de influencia del cultivo. Se inicia cuando se especifica para cada cultivo y el procedimiento es el siguiente:

- Cálculo del nodo correspondiente a la zona de influencia del cultivo;
- Cálculo de la profundidad total del cultivo;
- Cálculo de la especie química en la zona cultivada;
- Aportación química en la superficie.

Tstep: los intervalos de tiempo se calculan por medio de esta rutina. Existiendo diversos factores que condicionan el intervalo.

- Un valor máximo especificado en el fichero de entrada que oscila entre 0,05 a 0,01 día.
- El tiempo necesario para finalizar el periodo diario.
- El tiempo necesario para completar un evento de infiltración o riego calculado utilizando la densidad de flujo superficial actual.
- El tiempo requerido para un flujo especificado asumiendo que la densidad de flujo máximo en el perfil se mantiene.
- El tiempo necesario para los eventos especificados por el usuario como son: la impresión del fichero, aplicaciones químicas, lluvias entre otras.

Para ejecutar esta rutina se necesitan, las fechas de inicio y final de la simulación, las fechas de germinación, emergencia, madurez de las raíces y de la planta, fecha de aplicaciones químicas y las fechas de riego y de lluvias.

Etrans: en esta rutina se calcula la evapotranspiración del cultivo con los datos de la rutina anterior.

Existe variantes entre usar la ecuación de Addiscott y la de Richards, la primera realiza los cálculos a intervalos de diez días asumiendo que la evapotranspiración es cero durante el periodo de infiltración, en el caso de usar la ecuación de Richards los cálculos se inician al momento de iniciarse la simulación.

La evaporación y la transpiración se asume que se inicia a las 07:00 y finaliza 12 horas más tarde a las 19:00 (0,3 días a 0,8 días respectivamente).

$$Etp = Etmax \sin [2\pi(t-0,3)] \quad (4.15)$$

Donde, $Etmax = Etp$ a las 13h 12 (0,55 días) y t es la horas del día, que varia entre 07h12 y 19h12.

La fracción de evapotranspiración se representa integrando la ecuación entre los límites de tiempo t_1 y t_2 representando el inicio y el final de un intervalo. Y para calcular la evaporación potencial (Ep) o la transpiración potencial (Tp) durante el intervalo de tiempo considerado se multiplica el valor de E y T por la fracción de evapotranspiración.

$$Ep = f E_{día} \quad (4.16)$$

$$Tp = f T_{día} \quad (4.17)$$

Los datos requeridos en la rutina son la evapotranspiración potencial semanal de todo el periodo de simulación y el factor de incremento de la transpiración por compensación de la evaporación específica del cultivo. El resto de los parámetros se calculan durante la ejecución del modelo.

Wuptak: esta rutina calcula la absorción de agua por las raíces, y el intervalo de tiempo se calcula dependiendo de la opción, por ejemplo Addiscott realiza el cálculo diariamente, mientras que la opción de Richards la calcula para cada intervalo de tiempo.

El término $U(z,t)$, en la ecuación de Richards, representa el agua extraída por las raíces por unidad de tiempo debido a la transpiración. Según Nimah y Haks (1973), citados por Beatle Sales y Hurtado (2003) el valor de absorción de agua por las plantas en un nodo i durante el intervalo $j-1$ a j puede estimarse a partir de la siguiente ecuación:

$$U_i^{j-1/2} = [H_{raíces} + z_i^j (1+Rc) - h_i^{j-1/2} - s_i^{j-1/2}] [RDF_i^{j-1/2} / \Delta x \Delta z] \quad (4.18)$$

Donde $U_i^{j-1/2}$ es la transpiración diaria para el nodo i , $H_{raíces}$ es el potencial efectivo del agua en las raíces en la superficie del suelo (mm), $1+Rc$ es la resistencia de las raíces especificada por el usuario, h_i es el potencial matricial del agua en el suelo (mm), s_i es el

potencial osmótico, RDF es la fracción del total de raíces activas presentes a la profundidad i , K_i es la conductividad hidráulica en (mm d^{-1}) z es la profundidad del nodo i y Δx es la distancia desde el punto, donde se ha medido el potencial matricial y osmótico, hasta las raíces (generalmente especificado en el código como 10 mm). Se puede utilizar otras ecuaciones de extracción modificando el código.

El potencial osmótico se calcula a partir de la conductividad eléctrica según la relación:

$$\psi_s = -36 \text{ CE (dS m}^{-1}\text{)} \quad (4.19)$$

4.12.8 Escorrentía

Runoff: se basa en el número de curvas para determinar la escorrentía esta metodología fue propuesta por la (USDA-SCS, 1972 Modificado por Williams 1991)

Cuando se usa la opción de flujo de Richards los cálculos se inician en cada evento de lluvia o de riego mientras que en la opción Addiscott, la escorrentía se calcula diariamente.

Según el método número de curva, el valor del coeficiente de escorrentía (C) varía con el valor de precipitación, creciendo a medida que la precipitación aumenta

La escorrentía se inicia cuando la precipitación supera el valor de Infiltración (I_a) denominado “intersección inicial”. A medida que la precipitación aumenta la escorrentía aumenta y la curva se aproxima asintóticamente a la línea discontinua que forma un ángulo de 45° con el eje de P. En cada punto la diferencia de P-E es la cantidad de lluvia retenida cuyo valor máximo posible se denomina “máxima retención potencial” y se expresa por la letra S, existiendo la relación siguiente entre S y I_a :

$$I_a = 0,2S \quad (4.20)$$

La relación entre la escorrentía y la precipitación viene definida por la expresión:

$$E = (p - I_a)^2 / (P + S - I_a) \quad (4.21)$$

Sustituyendo I_a , se obtiene la expresión:

$$E = (P - 0,2S)^2 / (P + S - I_a) \quad (4.22)$$

Estas ecuaciones son validas para valores de P comprendidos entre $I_a < P < (E + S)$, para calcular el valor máximo de retención potencial (S) se aplica la ecuación:

$$S = [(25.400/CN) - 254] \quad (4.23)$$

Donde CN es el número de curvas. Para calcular el valor de CN se establecen tres categorías de humedad previa: humedad en el punto de marchitez permanente (CN1), humedad a capacidad de campo (CN3) y una humedad intermedia (CN2). El valor de CN2 se obtiene en función de las características hidráulicas del suelo y las prácticas agrícolas a partir de una tabla elaborada por la USDA-SCS (1972). El resto de las curvas se relacionan con CN2 de la siguiente manera.

$$CN1 = [CN2 - 20 (100 - CN2)] / [100 - CN2 + \exp^{(2.533 - 0.0636(100 - CN2))}] \quad (4.24)$$

$$CN3 = CN2 \exp^{(0.00673 * (100 - CN2))} \quad (4.25)$$

4.12.9 Transporte de agua y solutos

Para simular el transporte de aguas y solutos el modelo LEACHM utiliza dos opciones: Addiscott y Richards. Si la opción escogida es Addiscott el modelo utiliza la rutina Calf tanto para simular el transporte de agua y solutos. Si la opción escogida es Richards, el modelo usa una rutina para simular el transporte del agua (Watflo) y otra para transporte de solutos (Solc).

Watflo: describe el flujo del agua de acuerdo con la ecuación de Richards la cual se deriva de la ecuación de Darcy y de la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}] - U(z, t) \quad (4.26)$$

Donde, θ es el contenido de humedad en volumen (m^3/m^3), H es la carga hidráulica (mm), K es la conductividad ($mm\ d^{-1}$), t es el tiempo (d), z es la profundidad (mm) y U es la extracción de agua debida a la transpiración calculada en la rutina Wuptak.

Si la variación de la humedad del suelo $C(\theta)$ es:

$$C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial h} \quad (4.27)$$

Donde h es la presión de agua en el suelo. Por ello la ecuación de continuidad se puede transformar en otra ecuación en la que la variable dependiente sea el potencial de presión:

$$(\frac{\partial h}{\partial t}) C(\theta) = \frac{\partial}{\partial z} [K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}] - U(z, t) \quad (4.28)$$

Para simular el flujo y la redistribución del agua en el suelo aplicando el cálculo diferencial, el perfil se divide en segmentos y el tiempo en intervalos. Estos intervalos de tiempo pueden ser distintos uno de otros, mientras que los segmentos del perfil son iguales. Los nodos superior e inferior se encuentran fuera del límite del perfil, sin embargo se utilizan para mantener definidas las condiciones de los límites del perfil.

Como el potencial de presión en el inicio del intervalo es conocido, el sistema de ecuaciones se puede resolver por el método de Gauss, a partir de la construcción de una matriz simétrica triangular y calcular el potencial en cada nodo al final del intervalo.

En cuanto al sentido del flujo del agua entre dos nodos puede ser ascendente (flujo de agua positivo) o descendente (flujo de agua negativo).

La densidad del flujo (q) se relaciona con el flujo de agua mediante la ecuación;

$$Q = W/At \quad (4.29)$$

Donde W representa el flujo de agua entre dos nodos y At el intervalo de tiempo.

Las condiciones de los límites superior e inferior se deben especificar en el fichero de entrada. En el caso del límite superior, ajustado el potencial de presión, se puede simular la infiltración ponderada o no ponderada, la evaporación o flujo cero. Durante la infiltración ponderada, el potencial de presión del primer nodo se fija en cero y mientras la infiltrabilidad del suelo sea mayor que el flujo de infiltración especificado, el flujo se mantiene constante.

Para fijar las condiciones del límite inferior se puede seleccionar varias opciones en el fichero de entrada que son: presencia de nivel freático constante, nivel freático variable, drenaje libre y flujo cero.

Solc: una vez estimado el flujo del agua por la rutina Watflo, el flujo químico se calcula utilizando la ecuación de convección-dispersión (ECD) incluida en la rutina solc. Esta rutina solamente se ejecuta si el modelo de flujo seleccionado es el modelo de Richards.

El movimiento de solutos está compuesto de cuatro procesos:

- Difusión en fase líquida debida al gradiente de concentración.
- Difusión en fase gaseosa, en caso de especie químicas volátiles.
- Convección (flujo de masa) debido al movimiento del agua con sales disueltas.
- Convección en fase gaseosa debida a las fluctuaciones de la presión, los ciclos de humectación-dsecación y fluctuaciones de la capa freática.

Combinando las ecuaciones de estos cuatro procesos se obtiene una expresión para el flujo de solutos (J_s) van Genuchten y Wierenga 1986 citado por Hurtado y Beatle Sales (2003).

$$J_s = J_{DL} + J_{CL} + J_{DG} + L_{CG} \quad (4.30)$$

Donde J_s es el flujo total de solutos (mg/m/d), J_{DL} es el flujo de difusión en la fase líquida, J_{CL} es el flujo de convección en la fase líquida, J_{DG} es el flujo de difusión en la fase gaseosa y L_{CG} es el flujo de convección en la fase gaseosa.

La densidad del flujo de difusión en ambas fases se representa mediante la ley de Fick:

$$J_D = D_0 \frac{dc}{dz} \quad (4.31)$$

Donde D_0 es el coeficiente de difusión iónico o molecular en la solución acuosa o en el aire y c es la concentración de la especie química (mg dm^{-3}).

La distribución del soluto entre la fase de absorción, la fase gaseosa y líquida se basa en una isoterma de absorción lineal de manera que la concentración de la sustancia absorbida es proporcional a la concentración en la solución.

$$C_s = K_d C_L \quad (4.32)$$

Donde C_s es la concentración de la especie química en la fase de absorción (mg kg^{-1}), C_L es la concentración en la solución (mg dm^{-3}) y K_d es un coeficiente de distribución ($\text{dm}^3 \text{kg}^{-1}$).

El valor del coeficiente de distribución puede variar con la profundidad y la especie química. En el caso de pesticida este coeficiente se puede calcular a partir de la fracción de carbón orgánico.

Cuando hay presencia de componentes volátiles es necesario establecer el coeficiente de distribución entre la fase gaseosa y la fase líquida. Esta distribución se basa en la ley de Henry modificada por Jury et al. (1983), citado por Beatle y Sales y Hurtado (2003):

$$C_G = K_H^* C_L \quad (4.33)$$

K_H^* es la constante de Henry modificada y se define como la densidad de saturación de vapor (C_G) de los componentes dividido por la solubilidad en el agua (C_L).

La cantidad total de sustancia (C_T) en las tres fases en un volumen de 1 dm^3 es:

$$C_T = \rho C_s + \theta C_L + \epsilon C_G \quad (4.34)$$

Donde ρ es la densidad aparente (kg dm^{-3}), θ es el contenido volumétrico del agua en el suelo, ϵ es el aire en el suelo calculado por diferencia entre la porosidad y el contenido volumétrico del agua en el suelo y C_G es la concentración en la fase gaseosa. Sustituyendo la ecuación de la isoterma de adsorción y la ley de Henry en esta expresión obtenemos la siguiente ecuación:

$$C_T = C_L (\rho K_d + \theta + \epsilon K_H) \quad (4.35)$$

- *Ecuación básica de difusión y convección*

En el caso de la difusión en la fase líquida la ley de Fick quedaría expresada mediante la ecuación:

$$J_{DL} = -D_p \theta (d_{CL}/dz) \quad (4.36)$$

El valor de D_p se estima a partir de la ecuación de Kemper y Van Schaik (1966) citado por Hurtado y Beatle y Sales (2003).

$$D_p \theta = D_{OL} a \exp^{(b\theta)} \quad (4.37)$$

Donde D_{OL} es el coeficiente de difusión en la fase líquida pura y a , b son constantes empíricas.

El flujo de convección de solutos en la fase líquida se representa mediante la expresión:

$$J_{CL} = -\theta D_M(q) d_{CL}/dz + q_{CL} \quad (4.38)$$

Donde q es el flujo macroscópico de agua y $D_M(q)$ es el coeficiente mecánico de dispersión debida a las variaciones de velocidad del flujo de agua. Este valor se puede estimar a partir de la velocidad del agua en los poros y la dispersividad según la ecuación:

$$D_M(v) = \lambda |v| \quad (4.39)$$

Donde v es la velocidad del agua en los poros y λ es la dispersividad, limitada en el LEACHM al rango de valores $(0,5 \Delta z - 2\Delta z)$.

La dispersividad es un parámetro dinámico, que depende del medio y que caracteriza la dispersión de un soluto en medio poroso. La dispersión longitudinal está relacionada con las variaciones en la velocidad del flujo de agua debidas a la variabilidad del tamaño de los poros y a la tortuosidad del sistema poroso, el modelo LEACHM no toma en cuenta la dispersión lateral, no obstante esta es generalmente, menor que la dispersión longitudinal.

El coeficiente de dispersión puede medirse a partir de la concentración de los solutos en el perfil y en la fracción de lixiviado de columnas experimentales Anderson y Woessner., (1992); Alvarez-Benedi et al. (1999) citados por Hurtado y Batles-Sales (2003). Los valores de dispersividad obtenidos en las columnas experimentales oscilan entre 80 mm para suelos arenosos y 128 mm para suelos arcillosos. La porosidad y el grado de uniformidad del tamaño de las partículas del suelo que más influyen en la dispersividad. Esta es directamente proporcional al coeficiente de uniformidad e inversamente proporcional a la porosidad.

En el caso de la difusión en la fase gaseosa el flujo de difusión puede calcularse a partir del gradiente de concentración acuoso según la ecuación:

$$J_{DG} = -D_{OG}K_H^* dC_I/dz \quad (4.40)$$

Donde D_{OG} es el coeficiente de difusión gaseosa en aire $\text{mm}^2 \text{d}^{-1}$ y depende de la tortuosidad.

En cuanto a la convección en fase gaseosa los cambios en el contenido de agua en el suelo y la presión pueden ocasionar flujos de aire en el suelo modificando el coeficiente de difusión gaseosa.

4.12.10 Ecuación de convección-dispersión (ECD)

La mayoría de situaciones de transporte químico suceden en condiciones transitorias de flujo de agua. Bajo estas condiciones el flujo y el contenido de agua varía con la profundidad y el tiempo, por ello se utiliza la relación de continuidad de masas:

$$\partial C_L / \partial t (\rho K_d + \theta + \epsilon K_H) = \partial / \partial z [\theta D(\theta, q) (\partial C_L / \partial z) - q C_L] \pm \Phi \quad (4.41)$$

La dirección del flujo de agua es importante para determinar la dirección de transporte de solutos y la concentración de cada nodo.

El desarrollo matemático genera errores de dispersión numérica que pueden minimizarse mediante el ajuste de los parámetros de dispersividad y el intervalo de tiempo para los cálculos químicos. Comparaciones de las curvas de las ruptura de solutos con CXTFIT, cuando la dispersividad es cero, el error es aproximadamente $0,5 \Delta z$ y que no hay error cuando la dispersividad es $2 \Delta z$. Para ajustar la dispersividad especificada a los valores estimados por CXTFIT se utiliza la ecuación siguiente:

$$\lambda_{usada} = -0,84 + 1.264 \lambda_{especificada} - 0,6458 (\Delta z) \quad (R^2=99.8\%) \quad (4.42)$$

En la última versión de LEACHM, desarrollada específicamente en respuesta a los problemas experimentales en la simulación del transporte químico no en equilibrio, la rutina de transporte ha sido reexaminada y se ha decidido utilizar una aproximación Crank-Nicolson de diferencia central ya que este procedimiento está libre de dispersión numérica.

Esta rutina también considera las condiciones de los límites superior e inferior de manera que en caso de flujo cero, con presencia de capa freática, durante el periodo de evaporación superficial se produce una acumulación de solutos en el segmento inferior. Durante la infiltración la concentración en el nodo 1 es igual a la concentración en el agua y no se tiene en cuenta la difusión, incrementándose temporalmente el contenido de agua para mantener el balance de

masas. En el nodo inferior la concentración de solutos es igual a la concentración del agua subterránea, estos cálculos se realizan en la rutina Cellc.

Calfc: se ejecuta esta rutina cuando la opción de flujo de agua seleccionada es la opción Addiscott, por tanto sustituye a las rutinas Watflo y Solfc (opción de Richards) y simula al mismo tiempo el movimiento del agua y de los solutos en el suelo.

El modelo de capacidad de Addiscott divide el agua del flujo en dos fases: una fase móvil, en la que se produce el transporte y otra fase inmóvil. Tras la lluvia o riego el agua infiltrada disuelve las sales en la fase móvil, posteriormente se produce el equilibrio entre la fase móvil e inmóvil en cada segmento del modelo y entre los segmentos adyacentes.

Los datos necesarios para la ejecución de esta rutina son: los contenidos de humedad a capacidad de campo W_c y en el punto de marchitez permanente W_m , el intervalo de la fase móvil W_d y el límite de evaporación o aire seco W_a , estos contenidos de humedad se calculan a partir de las curvas de humedad usando potenciales matriciales definidos en el modelo, W_d es el intervalo de la fase móvil del agua especificado en el fichero de entrada y el límite de evaporación se obtiene de los primeros 50 mm.

Los cálculos de la rutina Calfc se realizan para cada intervalo de tiempo. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- Cálculo de la evapotranspiración en cada segmento.
- Partición química entre la fase de absorción, disolución y precipitación, asumiendo el equilibrio completo entre la fase móvil e inmóvil.
- Cálculo de la fracción de lixiviación durante la lluvia o riego.
- Redistribución vertical del agua y las sales de acuerdo con el potencial hídrico y las diferencias de concentración.
- Repetición de la partición química.
- Comprobación del balance de masas e impresión de datos.

El cálculo de la fracción de lixiviación se produce durante los eventos de lluvia o riego y cuando hay aplicaciones de fertilizantes químicos. Para ellos se consideran los contenidos de humedad (W_i y W_m) y las concentraciones de los solutos (C_i y C_m) en cada fase al inicio del evento y se calcula las nuevas condiciones de humedad (W_i' y W_m') y concentraciones (C_i' y C_m') para cada segmento teniendo en cuenta la cantidad de agua que se mueve entre los segmentos. La cantidad de agua que progresa a través de los segmentos (W_p) disminuirá con la profundidad, ya que se va quedando retenida en los segmentos superiores.

Tras la adición de agua se produce un incremento en los contenidos de agua ambas fases y esto provoca cambios en la concentración de solutos según las ecuaciones siguientes:

$$W_i' = W_i + \min(W_d - W_i, W_p) \quad (4.43)$$

$$Wp' = Wp - \min(Wd - Wi, Wp) \quad (4.44)$$

$$Ci' = [Cp(Wi' - Wi) + Ci]/Wi \quad (4.45)$$

$$Wm' = Wm + Wp' \quad (4.46)$$

$$Cm' = [Cp(Wm' - Wm) + CmWm]/Wm' \quad (4.47)$$

Si el contenido de humedad entre ambas fase es superior a la humedad en capacidad de campo $((Wm + Wi) > Wfc)$, la diferencia es el contenido de agua que progresa hacia el siguiente segmento (Wp) . De esta forma parte de los solutos se disuelven y se desplazan hacia el nodo interior.

Cuando la suma entre los contenidos de humedad de ambas fases es menor a la humedad a capacidad de campo, lo cual ocurre con posterioridad al evento de lluvia o riego, se produce la redistribución y equilibrio entre las fases. En este proceso se calcula la cantidad de agua que se mueve entre los nodos y la disolución de las sales.

Cellc: una vez que se ejecuta la rutina de transporte Solc se ejecuta inmediatamente esta rutina, pero solo si aparece una zona saturada de agua en que se producen movimientos de ascenso y descenso capilar. Esto también sucede cuando la condición especificada para el límite inferior es la presencia del nivel freático. Conceptualmente la celda de mezclado corresponde a una profundidad fija de agua con ganancia de solutos cuando el drenaje es hacia abajo y pérdida de soluto cuando asciende por capilaridad. El total de solutos en la celda de mezclado $(C_T, \text{mg/m}^2)$ se calcula:

$$C_T = C_{\text{cell}} Z_w \quad (4.48)$$

Donde C_{cell} es la concentración de solutos en la celda (mg/l) y Z_w es la profundidad del agua en la celda. Durante los intervalos de tiempo en que el flujo de agua es descendente, los cambios en la concentración se calculan así.

$$\Delta C_T = C_k q_w \quad (4.49)$$

Donde C_k es la concentración de las sales. Si el flujo es ascendente:

$$C_k = C_T / Z_w \quad (4.50)$$

Las concentraciones iónicas de la zona se especifican en el fichero de entrada.

4.12.11 Equilibrio químico: Chem.for y Equilchm.for

El equilibrio químico se compone de dos subrutinas: Chem.for y Equilchm.for. En el programa LEACHC cada especie química es transportada por difusión y convección durante cada intervalo de tiempo, sin embargo el equilibrio entre las tres fases se calcula a otros intervalos fijados por el usuario. Las especies químicas tratadas en esta versión son Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} , CO_3^{-2} , HCO_3^- , H^+ , OH^- y sus pares iónicos mayoritarios según la Tabla 4.15.

El intercambio catiónico, los procesos de precipitación-disolución y el intercambio con la atmósfera se describen separadamente en la rutina denominada Chem.for. Tras el transporte de la fase en disolución se establece un equilibrio con la calcita, el yeso, PCO_2 y la fase de intercambio (Snoeyink y Yenkin 1987; Sparks, 1998) citados por Hurtado y Beatle y Sales (2003). Cuando el flujo de solutos entre intervalos de tiempo es pequeño no es necesario ejecutar las rutinas de equilibrio.

La rutina Chem.for asume que la solución del suelo para cada incremento de profundidad es un sistema abierto respecto al dióxido carbono, de manera que los niveles de CO_2 pueden variar con la profundidad pero no con el tiempo. La distribución de los niveles de CO_2 se especifica en el fichero de entrada de LEACHC. Por otra parte la constante de Henry (K_H) se asume como independiente de la temperatura y la concentración de las sales. Todas las constantes de equilibrio se han tomado de Adams (1973) o Lindsay (1979), excepto el producto de actividad iónica para CaCO_3 que se ha tomado de Suárez (1977), ambos citados por Hurtado y Beatle Sales (2003). Estos valores pueden ser modificados dentro de esta rutina.

Tabla 4.15. Especies químicas consideradas por la rutina Chem.for.

ESPECIES QUÍMICAS CONSIDERADAS EN LA RUTINA CHEM.FOR						
SOLUBLES						INTERCAMBIO
H^+	OH^-	CO_3^{-2}	HCO_3^-	SO_4^{-2}	Cl^-	
Ca^{+2}	CaOH^-	CaCO_3^0	CaHCO_3^-	CaSO_4^0		Xca
Mg^{+2}	MgOH^-	MgCO_3^0	MgHCO_3^-	MgSO_4^0		XMg
Na^+		NaCO_3^-		NaSO_4^0		Xna
K^+				KSO_4^-		XK
						PRECIPITADO
						CaSO_4 CaCO_3

La rutina de equilibrio químico ajusta la composición de la solución y la fase absorbida satisfaciendo las siguientes constantes de equilibrio termodinámico.

- La constante de Henry para CO_2

$$K_{a1} = (\text{H}^+) (\text{HCO}_3^-) / (\text{H}_2\text{CO}_3) \quad (4.51)$$

$$(\text{H}_2\text{CO}_3) = \text{PCO}_2 \times K_K \quad (4.52)$$

$$K_{a1} \times P_{CO_2} \times K_h = (H^+) (HCO_3^-) \quad (4.53)$$

- La primera y la segunda constante de disociación de H_2CO_3

$$K_{a1} = (H^+) (HCO_3^-) / (H_2CO_3) \quad (4.54)$$

$$K_{a2} = (H^+) (CO_3^{2-}) / (HCO_3^-) \quad (4.55)$$

- La constante de disociación del agua

$$K_w = (H^+) (OH^-) \quad (4.56)$$

- Los productos de solubilidad del yeso y la calcita

$$K_{sp1} = (Ca^{+2}) (SO_4^{-2}) \quad (4.57)$$

$$K_{sp2} = (Ca^{+2}) (CO_3^{-2}) \quad (4.58)$$

- Las constantes de estabilidad de los pares iónicos

$$K_f = (Cat^{m+}) (An^{n-}) / (CatAn^{m-n}) \quad (4.59)$$

- La actividad basada en los coeficientes de Gapon. Robbins et al. (1980).

$$K_G = ((M^{m+})^{1/m} X N_{1/n}) / ((N^{n+})^{1/n} X M_{1/m}) \quad (4.60)$$

El modelo asume que la capacidad de intercambio catiónico y los coeficientes de selectividad son constante a todos los pH y valores de fuerza iónica, por tanto no tienen en cuenta el desarrollo de carga variable dependiente del pH. Por otra parte la capacidad de intercambio catiónico se considera igual a la suma de los cationes de intercambio.

El procedimiento de cálculo de la composición en el equilibrio químico es el siguiente:

- Cálculo de la fuerza iónica.

$$\mu = 0,5 \sum c_i z_i^2 \quad (4.61)$$

Donde μ es la fuerza iónica, c_i es la concentración del ión (mol dm^{-3}), z_i es la valencia y Σ indica la suma de todas las especies iónicas en solución. Inicialmente la fuerza iónica se calcula a partir del análisis de la concentración total.

- Cálculo de los coeficientes de actividad para iones mono y divalentes

$$\text{Log} \gamma_i = -0,509 \text{ Zi}^2 (\mu^{1/2}/1,0 + \mu^{1/2}) - 0,31 \quad (4.62)$$

- Cálculo de las constantes de equilibrio, del equilibrio condicional a partir de las constantes de equilibrio termodinámicas y la actividad actual.
- Cálculo de las concentraciones de $[\text{HCO}_3^-]$, $[\text{CO}_3^{2-}]$, $[\text{Ca}^{+2}]$ y $[\text{SO}_4^{2-}]$ a partir de pH y el nivel de pCO_2 fijado.
- Distribución de los cationes entre las fases de intercambio y la solución satisfaciendo los *coeficientes de Gapon*.

El proceso se repite en cada intervalo hasta que la composición de la solución se estabiliza.

La conductividad eléctrica de la solución se calcula a partir de las concentraciones iónicas individuales utilizando dos ecuaciones. La primera se basa en el método de McNeal et al. (1970) y el segundo está descrito por la ecuación de Marión y Babcock citados por Hurtado y Beatle Sales (2003) y se basa en la ecuación modificada de Onsanger-Fuoss.

En el cálculo del equilibrio químico hay tres posibles vías que se especifican en el fichero de entrada, asumiendo que los datos analíticos iniciales están en equilibrio. Si los coeficientes de selectividad son conocidos la rutina Chem.for calcula la composición en equilibrio a partir de la suma de los cationes solubles y de intercambio. Si los cationes solubles y de intercambio están en equilibrio la rutina calcula los coeficientes de selectividad. Por último si los coeficientes de selectividad y los cationes solubles están en equilibrio la rutina calcula los cationes de intercambio.

Es importante tener en cuenta que los valores analíticos iniciales se toman a partir del extracto de saturación de manera que el contenido de humedad puede ser diferente al de inicio de la simulación debiéndose recalcular esta composición a las condiciones de humedad correspondiente. Para ello se dispone del programa CHEMEQ que permite realizar estos cálculos previamente a la introducción de los datos en el fichero de entrada. Por otra parte este programa permite hacer los nuevos cálculos teniendo en cuenta la pCO_2 y la densidad aparente.

4.12.12 Formato de fechas

La rutina Cadate se ejecuta al inicio de cada día para incrementar la fecha. Las simulaciones se pueden realizar para un periodo de simulación menor a 100 años. El formato de la fechas debe seleccionarse en el fichero de entrada.

La rutina Daycalc calcula el número de días a partir de la fecha especificada. Los números menores que 010100 se consideran el número de días mientras que números mayores se consideran como fechas y con esta rutina se transforman en número de días.

4.12.13 Fichero de salida

Fichero detallado (*.out): este fichero se imprime para intervalos de tiempo especificado o para fechas concretas. Está compuesto de diversas tablas separadas:

- Tabla de datos de retención de agua y conductividad hidráulica del perfil.
- Resumen del balance de masa acumulativo para el conjunto del perfil.
- Contenido químico, hídrico, potencial y flujo en los nodos del perfil.
- Desarrollo de la vegetación, nutrición y transpiración.

En el fichero de entrada se pueden seleccionar las tablas a imprimir.

Fichero resumen (*.sum): el archivo resumen contiene un registro por impresión. El intervalo de impresión puede ser definido por el usuario.

El perfil se divide en tres secciones que pueden ser definidas por el usuario, haciéndolas corresponder con los horizontes del mismo o por defecto en partes iguales. Para establecer la cuarta sección se puede seleccionar entre la zona radicular, el conjunto del perfil, límite inferior o límite de la capa freática.

Cada registro contiene de forma acumulativa, el tiempo transcurrido, los aportes de agua (riego + lluvia), la transpiración actual, la evaporación y los flujos químicos para las cuatro secciones consideradas. El flujo del agua también se presenta para la superficie del perfil y los contenidos de agua y de solutos se presentan para las cuatro capas del perfil

Fichero de curvas de ruptura (*.btc): este fichero recoge unos listados de los flujos de agua y solutos lixiviados. Se utiliza normalmente para registrar las salidas en columnas de laboratorio y para registrar el lixiviado de los perfiles del campo.

Estos datos tienen poco sentido cuando el agua del suelo asciende por el perfil como por ejemplo en el caso de presencia de agua freática.

Los datos impresos en este fichero son: fracción de tiempo, flujo acumulado de agua, concentraciones de flujo promediado para cada especie química y masa acumulada de los solutos lixiviados.