



unl

Universidad
Nacional
de Loja

Producción Agropecuaria sostenible en suelos Arcillosos del piso temperado Andino del Sur del Ecuador



Luís Valarezo Manosalvas
Carlos Valarezo Manosalvas
Mario Mancino Valdivieso



Universidad
Nacional
de Loja

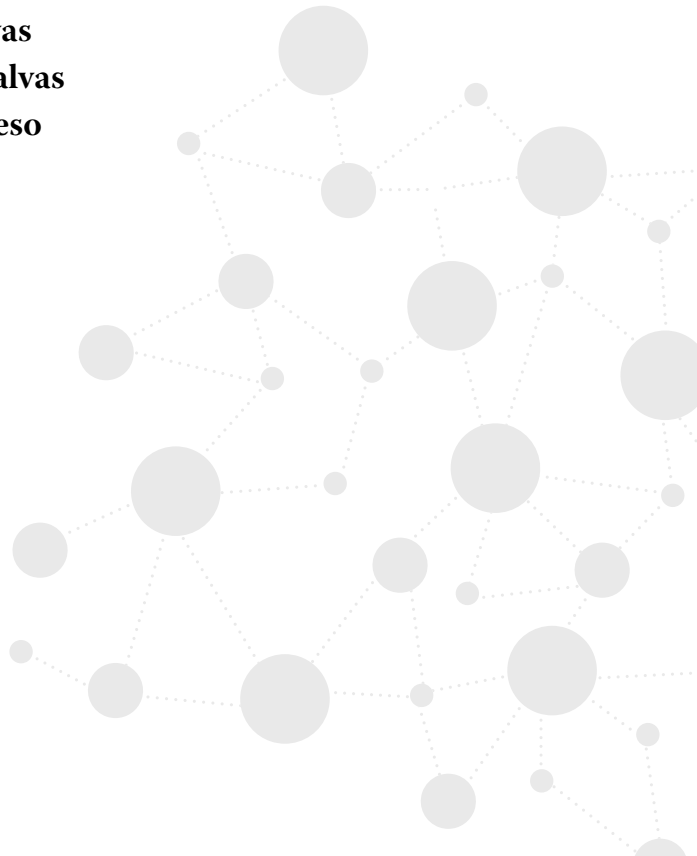
PRODUCCIÓN AGROPECUARIA SOSTENIBLE EN SUELOS ARCILLOSOS DEL PISO TEMPERADO ANDINO DEL SUR DEL ECUADOR

Caso Sistema de Riego Santiago

Luís Valarezo Manosalvas

Carlos Valarezo Manosalvas

Mario Mancino Valdivieso





unl

Universidad
Nacional
de Loja

Ph. D. Nikolay Aguirre

Rector UNL

Ph. D. Mónica Pozo Vinuesa

Vicerrectora Académica

Ph. D. Max Encalada Córdova

Director de Investigación

**PRODUCCIÓN AGROPECUARIA SOSTENIBLE EN SUELOS ARCILLOSOS DEL
PISO TEMPERADO ANDINO DEL SUR DEL ECUADOR
Caso Sistema de Riego Santiago**

Autores:

Luís Valarezo Manosalvas

Carlos Valarezo Manosalvas

Mario Mancino Valdivieso

Revisión Par Académico:

Mg. Sc. Máximo Gilbert Iniguez

Dr. Octavio Gustavo Samaniego Rodríguez

ISBN-9

Diseño e impresión:

Torres & Cordero PGI.

Contacto: 593-7-877274 - 0995561827

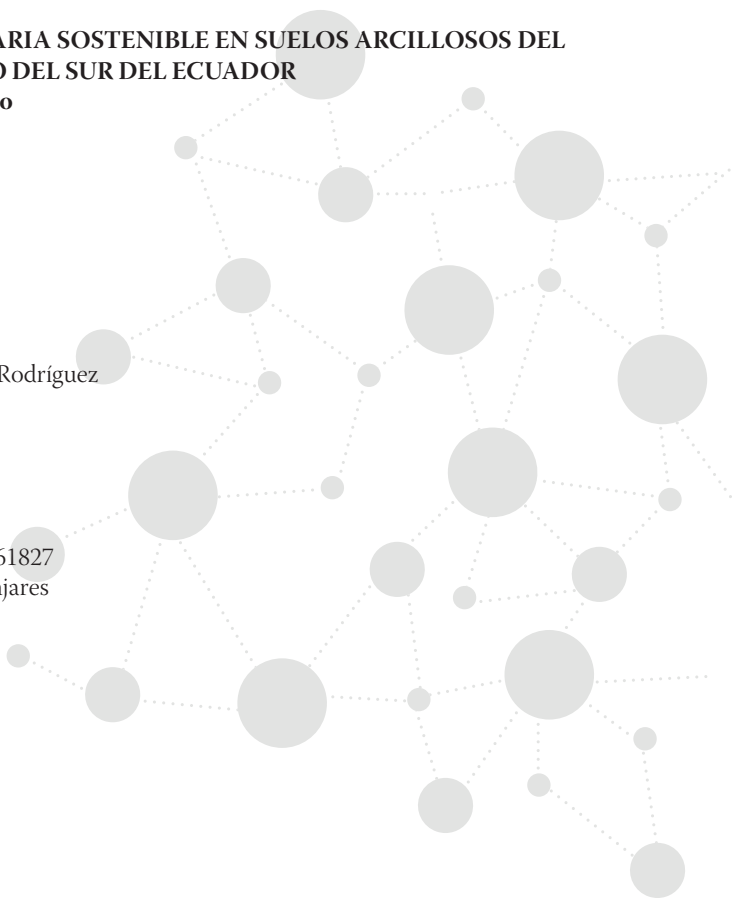
Rafael Carpio Abad y de los Manjares

toricor@hotmail.com

Cuenca-Ecuador

Enero, 2021

Cuenca, Ecuador



Agradecimiento

Los autores expresan su especial agradecimiento a las siguientes personas que contribuyeron en el proceso de investigación, elaboración y publicación del presente libro: Dr. Nikolay Aguirre Mendoza, Rector de la Universidad Nacional de Loja (UNL), quien autorizó la publicación de la obra por la institución. Dr. Max Encalada, Director de Investigación de la UNL, por las facilidades brindadas para la edición final y publicación. Ing. Guillermo Falconí, Ing. Antonio Gaybor y Dr. Max González, por sus magníficos y fundamentados prólogos. Dr. Gustavo Samaniego e Ing. Max Iníguez M.Sc., revisores del borrador, designados por la Universidad Nacional de Loja. Ing. Miguel Villamagua, por su colaboración en la descripción de los perfiles de los suelos. Dr. Ramiro Vásquez, por sus importantes criterios sobre el procesamiento estadístico de los datos de la investigación de campo. Al Dr. Zhofre Aguirre, por su aporte autorizado sobre las especies vegetales para los sistemas agroforestales que se proponen. A la Ing. Doris Quezada, Secretaria de la Junta de Regantes del Sistema de Riego Santiago por la valiosa información proporcionada sobre la reglamentación de la Organización. A los propietarios de los terrenos del área de Salapa, que constituye la Junta 2 del Sistema de Riego Santiago, en los cuales se realizaron las calicatas de los perfiles, y se estudiaron las características físico-químicas y el comportamiento hidrodinámico de los suelos: Sr. Efraín Quezada, Sra. Maribel Quezada, Sr. José Luis Paccha Malla e Ing. José Paccha.

Dedicatoria

A mis hijas: Andrea Lucía y Dayuma del Cisne

A mis nietos: Camila Sofía, Francisco Rafael y Benjamín de Jesús

Luis Guillermo

Con todo afecto a:

Mi esposa: Elsa Cecilia

Mis hijos: Leonardo Mauricio, Iván Patricio y Carla Cecilia

Mis nietos: Rossana Sofía, Juliana Cecilia y Daniel Alejandro.

Carlos Antonio

Con todo amor a:

Mi esposa: Elena

Mis hijos: Francesca, Rafaella y Alejandro

Mario José

Índice

Agradecimiento	5
Dedicatoria	7
Índice	9
Índice de cuadros	17
Índice de figuras	19
Guillermo Falconí Espinosa	21
Ing. Antonio Gaybor Secaira	24
Dr. Max González Merizalde	26
Prefacio	29
Preface	35
1. Marco Conceptual	41
1.1. Propiedades físicas y químicas del suelo que influyen en la dinámica del agua.....	41
1.1.1. Textura	41
1.1.2. Estructura.....	43
1.1.3. Porosidad, densidad real y densidad aparente	44
1.1.4. Acidez del suelo	48
1.1.5. Materia orgánica.....	49
1.2. Contenido de agua del suelo.....	50
1.2.1. Importancia del agua del suelo y rango de contenido	50
1.2.2. Unidades del contenido de agua del suelo	51
1.2.2.1. Unidades de masa (θ_m).....	52
1.2.2.2. Unidades de volumen (θ_v).....	52
1.2.2.3. Unidades lineales.....	53
1.2.3. Métodos para determinar el contenido de humedad del suelo	53
1.2.3.1. Método gravimétrico	54
1.2.3.2. Método sonda de neutrones	54
1.2.3.3. Métodos dieléctricos.....	55
1.2.3.3.1. Reflectometría en el dominio de tiempo (TDR)	56
1.2.3.3.2. Reflectometría de dominio de frecuencia (FDR)	57
1.2.3.4. Método visual y del tacto.....	58

1.3.	Energía del agua en el suelo	58
1.3.1.	Importancia y formas de la energía del agua en el suelo.	58
1.3.2.	Potencial del agua del suelo	59
1.3.3.	Componentes del potencial del agua del suelo	60
1.3.3.1.	Potencial gravitacional (ψ_g)	61
1.3.3.2.	Potencial de presión (ψ_p).....	62
1.3.3.3.	Potencial matricial (ψ_m)	63
1.3.3.4.	Potencial osmótico (Ψ_o)	65
1.4.	Curva característica de humedad del suelo	65
1.4.1.	Principio e importancia	65
1.4.2.	Factores que determinan la forma de la curva característica de humedad del suelo	66
1.4.3.	Puntos importantes de la curva característica de humedad del suelo	67
1.4.3.1.	Saturación	67
1.4.3.2.	Capacidad de campo (CC).....	68
1.4.3.3.	Punto de marchitez permanente (PMP).....	69
1.4.3.4.	Agua aprovechable (AA).....	69
1.4.3.5.	Capacidad de aireación (CA).....	70
1.4.4.	Determinación de la curva característica de humedad del Suelo.....	70
1.4.4.1.	Método del tensiómetro	70
1.4.4.2.	Bloques de yeso	72
1.4.4.3.	Sensores de matriz granular	72
1.4.4.4.	Método de la cámara de presión.....	73
1.4.5.	Condiciones físicas del suelo para el crecimiento de las plantas	74
1.5.	Infiltración del agua en el suelo	75
1.5.1.	Características del proceso y su importancia	75
1.5.2.	Factores que influyen en la velocidad de infiltración	77
1.5.3.	Procedimientos para estimar la velocidad de infiltración.....	79
1.5.4.	Interpretación de los valores de la infiltración básica.....	80
1.6.	Flujo de agua en suelo saturado.....	80
1.6.1.	Conductividad hidráulica saturada (Ks)	80
1.6.1.1.	Principio e importancia.....	80
1.6.1.2.	Factores que afectan la conductividad hidráulica.....	83

1.6.1.3. Métodos para determinar la conductividad hidráulica.....	84
1.6.1.3.1. Métodos de laboratorio.....	85
1.6.1.3.1.a. Método de permeámetro de carga constante	85
1.6.1.3.1.b. Método de permeámetro de carga variable	85
1.6.1.3.2. Métodos de correlación	86
1.6.1.3.3. Métodos de campo (in-situ).....	86
1.6.1.3.3.a. Métodos de campo (in-situ) a pequeña escala.....	86
1.6.1.3.3.b. Métodos de campo (in-situ) a gran escala.....	89
1.6.1.4. Interpretación de los valores de la conductividad hidráulica del suelo	89
1.7. Compactación del suelo.....	90
1.7.1. Terminología y proceso de compactación.....	90
1.7.2. Evaluación de la compactación.....	96
1.7.2.1. Resistencia a la penetración.....	96
1.7.2.2. Densidad aparente	98
1.8. Afectación de los recursos naturales por la ganadería.....	99
2. El Sistema de Riego Santiago	103
2.1. Características biofísicas	103
2.1.1. Fisiografía y geología.....	103
2.1.2. Clima y zona de vida	104
2.1.3. Suelos.....	106
2.1.4. Fuentes hídricas del Sistema de Riego Santiago.....	106
2.2. Área regada y usuarios del Sistema de Riego Santiago	108
2.3. Estructura socio - organizativa del Sistema de Riego Santiago .	109
2.4. Operación y mantenimiento del Sistema de Riego Santiago.....	111
2.5. Riego parcelario.....	112

3. Comportamiento Hidrodinámico del Suelo en el Área de Riego de Salapa, en Relación al Uso de la Tierra y Pendiente del Terreno.....	115
3.1. Ubicación de perfiles de suelo, forma del terreno, drenaje y grado de erosión.....	115
3.2. Características morfológicas y físico-químicas de los suelos....	119
3.2.1. Perfil P1Z (uso: pastos; pendiente del terreno: 28%).....	119
3.2.1.1. Descripción general del perfil.....	119
3.2.1.2. Características físico - químicas.....	120
3.2.2. Perfil P2Z (uso: hortalizas; pendiente del terreno: 20%) .	120
3.2.2.1. Descripción general del perfil.....	120
3.2.2.2. Características físico - química.....	121
3.2.3. Perfil P3Z (uso: hortalizas; pendiente del terreno: 12%) .	122
3.2.3.1. Descripción general del perfil.....	122
3.2.3.2. Características físico - químicas.....	123
3.2.4. Perfil P4Z (uso: pastos; pendiente del terreno: 14%).....	123
3.2.4.1. Descripción general del perfil.....	123
3.2.4.2. Características físico - químicas.....	124
3.2.5. Perfil P5Z (uso: pastos; pendiente del terreno: 3%).....	125
3.2.5.1. Descripción general del perfil.....	125
3.2.5.2. Características físico - químicas.....	126
3.2.6. Perfil P6Z (uso: hortalizas; pendiente del terreno: 7%)....	126
3.2.6.1. Descripción general del perfil.....	126
3.2.6.2. Características físico - químicas.....	127
3.2.7. Efecto del uso del suelo y la pendiente del terreno sobre las características físico -químicas del horizonte Ap.....	128
3.3. Comportamiento hidrodinámico de los suelos.....	129
3.3.1. Retención de humedad del suelo y condiciones físicas para el crecimiento de las plantas.....	129
3.3.1.1. Perfil P1Z (uso: pasto; pendiente del terreno: 28%)	130
3.3.1.1.1. Condición física de la capa 00 - 15 cm	130
3.3.1.1.2. Condición física de la capa 15 - 35 cm	130
3.3.1.2. Perfil P2Z (uso: hortaliza; pendiente del terreno: 20%)	132

3.3.1.2.1.	Condición física de la capa 00 - 05 cm	132
3.3.1.2.2.	Condición física de la capa 05 - 30 cm	132
3.3.1.3.	Perfil P3Z (uso: hortalizas, pendiente del terreno: 12%)	133
3.3.1.3.1.	Condición física de la capa 00 - 06 cm	133
3.3.1.3.2.	Condición física de la capa 06 - 16 cm	135
3.3.1.4.	Perfil P4Z (uso: pastos, pendiente del terreno: 14%)	135
3.3.1.4.1.	Condición física de la capa 00 - 06 cm	135
3.3.1.4.2.	Condición física de la capa 06 - 22 cm	136
3.3.1.5.	Perfil P5Z (uso: pasto, pendiente del terreno: 3%).....	136
3.3.1.5.1.	Condición física de la capa 00 - 08 cm	136
3.3.1.5.2.	Condición física de la capa 08 - 15 cm	137
3.3.1.6.	Perfil P6Z (uso: hortalizas, pendiente: 7%)	137
3.3.1.6.1.	Condición física de la capa 00 - 18 cm	137
3.3.1.6.2.	Condición física de la capa 18 - 31 cm	138
3.3.1.7.	Efecto del uso del suelo y la pendiente del terreno sobre la condición física de la zona radicular del suelo	138
3.3.1.7.1.	Capacidad de Aireación.....	139
3.3.1.7.2.	Agua aprovechable	140
3.3.2.	Conductividad hidráulica.....	143
3.3.2.1.	Conductividad hidráulica de los horizontes superiores (método del permeámetro de carga constante).....	143
3.3.2.2.	Conductividad hidráulica del tercer horizonte (método del hoyo barrenado invertido).....	144

3.3.3. Infiltración	145
3.3.3.1. Infiltración básica	145
3.3.3.2. Relación de la infiltración con otras propiedades del suelo.....	149
3.3.3.2.1. Infiltración básica vs densidad aparente.....	149
3.3.3.2.2. Infiltración básica vs porosidad total	150
3.3.3.2.3. Infiltración básica vs macroporosidad.....	150
3.4. Compactación del suelo.....	151
3.4.1. Resistencia del suelo a la penetración.....	151
3.4.2. Relación de la resistencia a la penetración con otras propiedades del suelo.....	152
3.4.2.1. Resistencia a la penetración vs porosidad total..	152
3.4.2.2. Resistencia a la penetración vs densidad aparente.....	153
4. Recomendaciones para el Aprovechamiento Sostenible del Suelo y el Agua en el Sistema de Riego Santiago	155
4.1. Uso del suelo con pastos	159
4.1.1. Sistemas de ganadería sostenible.....	160
4.1.1.1. Sistemas silvopastoril.....	162
4.1.1.1.1. Prácticas silvopastoriles	164
4.1.1.2. Sistema de pastoreo Racional Voisin.....	167
4.1.1.3. Carga animal y uso eficiente de los forrajes en la producción lechera.....	172
4.1.2. Balance nutricional en sistemas de pastoreo.....	174
4.1.2.1. Consumo de forrajes.....	176
4.1.2.2. Factores de manejo	176
4.1.2.3. Factores del forraje.....	177
4.1.2.4. Consumo máximo de forraje	178
4.1.2.5. Consumo total de materia seca.....	179
4.1.2.6. Consumo mínimo de forrajes.....	180
4.1.2.7. Capacidad de carga de la finca.....	181
4.1.2.7.1. Aforo de praderas.....	181
4.1.2.7.2. Frecuencia de pastoreo	182
4.1.2.7.3. Volumen de forraje producido	182
4.1.2.7.4. Calidad del forraje.....	182

4.1.2.8. Suplementación de vacas en pastoreo.....	184
4.1.3. Métodos probados de renovación de potreros	185
4.1.3.1. Renovación de praderas.....	186
4.1.3.2. Reemplazo de praderas	188
4.1.4. Prácticas de manejo y conservación del suelo.....	190
4.1.4.1. Fertilización.....	190
4.1.4.2. Aplicación de sulfato de calcio	191
4.1.4.3. Encalado del suelo.....	192
4.1.4.4. Practicas mecánicas de conservación de suelos	192
4.1.5. Optimización del uso del agua de riego.....	192
4.2. Uso del suelo con hortalizas	193
4.2.1. Manejo y conservación del suelo	193
4.2.2. Optimización del uso del agua de riego.....	194
5. Bibliografía.....	197
6. Anexos.....	223

Índice de cuadros

Cuadro 1.	Clases texturales del suelo.....	43
Cuadro 2.	Número de usuarios, área regada y sectores que componen las Juntas del Sistema de Riego Santiago.....	108
Cuadro 3.	Ubicación y características generales de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago.....	118
Cuadro 4.	Textura, pH, acidez cambiable y materia orgánica del perfil P1Z.....	120
Cuadro 5.	Textura, pH, acidez cambiable y contenido de materia orgánica del perfil P2Z	122
Cuadro 6.	Textura, pH, acidez cambiable y contenido de materia orgánica del perfil P3Z	123
Cuadro 7.	Textura, pH, acidez cambiable y contenido de materia orgánica del perfil P4Z	124
Cuadro 8.	Textura, pH, acidez cambiable y contenido de materia orgánica del perfil P5Z	126
Cuadro 9.	Textura, pH, acidez cambiable y materia orgánica del perfil P6Z.....	127
Cuadro 10.	Características físico - químicas del horizonte Ap de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago	129
Cuadro 11.	Retención de humedad en el rango de pF 0,0 a pF 4,2 de los dos primeros horizontes de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago.....	131
Cuadro 12.	Capacidad de aireación, agua aprovechable, volumen físicamente inerte y zona del diagrama triangular, de los dos primeros horizontes de los seis perfiles, para diferentes usos de suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago.....	134

Cuadro 13. Conductividad hidráulica saturada (Ks) de los dos primeros horizontes de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rango de pendiente del terreno, determinada por el método del permeámetro de carga constante en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago	144
Cuadro 14. Conductividad hidráulica saturada del tercer horizonte de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno, determinada por el método del barreno invertido (Porchet) en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago	145
Cuadro 15. Infiltración básica de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno, determinada con cilindros infiltrómetros en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago	146
Cuadro 16. Resistencia a la penetración de la capa superior de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno, determinada con el penetrómetro manual en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago	151
Cuadro 17. Máximo consumo de forraje de pastoreo (kgMS día ⁻¹).....	178
Cuadro 18. Características nutricionales de algunos forrajes comunes en la zona.....	179
Cuadro 19. Consumo necesario de materia seca (kg día ⁻¹) para diferentes niveles de producción de leche	180
Cuadro 20. Consumo mínimo de FDN proveniente del forraje	181
Cuadro 21. Cálculo del inventario forrajero de una finca de 55 ha de pastoreo	182
Cuadro 22. Contenidos óptimos de FDN y de proteína (PC) en la dieta ...	183

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del Sistema de Riego Santiago en la parroquia El Valle, cantón Loja y provincia de Loja - Ecuador	104
Figura 2. Canal principal y redes secundarias de las Juntas 2, 3, 4 y 5 del Sistema de Riego Santiago	109
Figura 3. Deslizamiento en masa en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago.....	113
Figura 4. Ubicación del área de Salapa del Sistema de Riego Santiago.....	116
Figura 5. Perfil P1Z.....	119
Figura 6. Perfil P2Z.....	121
Figura 7. Perfil P3Z.....	122
Figura 8. Perfil P4Z.....	124
Figura 9. Perfil P5Z.....	125
Figura 10. Perfil P6Z.....	127
Figura 11. Curvas de retención de humedad del primer horizonte de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago.....	142
Figura 12. Curvas de retención de humedad del segundo horizonte de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago.....	142
Figura 13. Curvas de infiltración acumulada de los seis perfiles, para diferentes usos del suelos y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago	146
Figura 14. Regresión lineal entre la velocidad de infiltración básica y la densidad aparente de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago	149
Figura 15. Regresión lineal entre la velocidad de infiltración básica y la porosidad de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago	150
Figura 16. Regresión lineal entre la velocidad de infiltración básica y la macroporosidad de los seis perfiles, para diferentes usos del	

suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago	151
Figura 17. Regresión lineal entre la resistencia a la penetración y la porosidad de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago	153
Figura 18. Regresión lineal entre la resistencia a la penetración y la densidad aparente de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago	154
Figura 19. Renovador de praderas	187
Figura 20. Aplicación de herbicida con la fumigadora.....	188
Figura 21. Descompactador de potreros.....	188
Figura 22. Rotavator Maschio	189
Figura 23. Rastra de discos en tándem.....	189
Figura 24. Potrero renovado en el área de Salapa.....	190
Figura 25. Asamblea General de Usuarios del Sistema de Riego Santiago.	195

Guillermo Falconí Espinosa

ex-Profesor de Pastos y Conservación de Suelos de la Carrera de Ingeniería Agronómica

ex-Rector de la Universidad Nacional de Loja

Vivimos en una época de asombroso desarrollo tanto en la ciencia como en la tecnología, pero a pesar de ello, muchos estudiosos en el mundo expresan su inquietud sobre los grandes desafíos que la humanidad debe enfrentar urgentemente si quiere sobrevivir. Uno de ellos y de máxima urgencia es el crecimiento demográfico y su demanda de alimentos, pues se estima que para el año 2050 la población mundial llegará a superar los nueve mil millones de habitantes, lo que demandará que se duplique la provisión de alimentos saludables y nutritivos, para lo que se requerirá incrementar en un 70% la productividad agropecuaria.

Este incremento poblacional conllevaría además un incremento notable de la urbanización, lo que significaría una conversión importante de tierra agrícola, fértil y productiva, a zona urbana, impulsando a los agricultores a ocupar terrenos en zonas áridas y accidentadas, no aptas para la agricultura.

Este proceso mundial de urbanización de las tierras agrícolas se reproduce con igual agresividad en nuestro medio, causado por un importante crecimiento poblacional de la ciudad de Loja. En 1950 el censo nacional señalaba que la población de la ciudad era de 26 597 habitantes que se incrementaron en 1982 a 87 281 habitantes, las proyecciones actuales señalan a la población de Loja en número cercano a 200 000 habitantes. Para atender este incremento poblacional, la ciudad se ha extendido en diferentes direcciones y a su paso han desaparecido los campos de cultivo y pastoreo, huertos de frutales y parcelas hortícolas que abastecían a la ciudad. Solo en la parte noroccidental de la Hoya de Loja, en la parroquia El Valle, en los sectores de Salapa, La Tenería, La Banda y Motupe, gracias al Proyecto de Riego de Santiago subsiste la producción agropecuaria, aunque con graves problemas que superar, entre ellos el avance urbano que ha reducido en un 50% el área potencialmente regable y el uso inapropiado del agua de riego.

Un reciente estudio económico europeo concluía que los beneficios ambientales del crecimiento de la productividad son muy superiores a los

beneficios económicos directos de la expansión de la superficie productiva. Ello significa que es más sostenible incrementar la productividad agraria en los terrenos ahora cultivados, que expandir las tierras de cultivo a suelos con capacidades no agrícolas.

Del análisis de la realidad circundante y de las reflexiones arriba expuestas, surge la necesidad de contar con referentes para desarrollar una producción agropecuaria sostenible, sobre la base del manejo eficiente de los recursos suelo y agua en la zona de Salapa, como un aporte técnico para mejorar la productividad de los suelos y contribuir a elevar el nivel y calidad de vida de los agricultores.

Es la comprensión de esta problemática la que motiva a dos profesores universitarios: Carlos Valarezo Manosalvas, Ingeniero Agrónomo, Máster en Física y Química de Suelos, Especialista en Drenaje de Tierras; y a Luis Valarezo Manosalvas, Ingeniero Agrícola, Máster en Riego Comunitario Andino. Ambos profesores de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Nacional de Loja, de meritoria trayectoria docente y extendida experiencia en Investigación Agrícola, y a Mario Mancino Valdivieso, Técnico de Nivel Superior en Administración Agrícola e Ingeniero en Administración de Empresas; exitoso empresario agropecuario en la zona de Salapa, a concebir y ejecutar el proyecto de investigación cuyos resultados hoy se presentan en esta publicación.

Este libro tiene un gran mérito, aglutinar el conocimiento científico-técnico y la experiencia práctica de tres profesionales de reconocida trayectoria en los campos del riego y drenaje y la fertilidad de los suelos; y, el manejo eficiente de los componentes de la ganadería bovina.

La estructura del libro es muy coherente, se inicia con una sistematización actualizada (estado del arte) sobre las características físico-químicas e hidrodinámicas de los suelos y los procesos de compactación por efecto de la ganadería, lo cual prepara al lector para la comprensión, con la suficiente base científica, de las características morfológicas, físico-químicas y el comportamiento hidrodinámico de 6 perfiles de suelos representativos de la combinación de dos usos del terreno prevalecientes y tres tipos de pendientes del terreno del área de Salapa que forma parte del Sistema de Riego de Santiago.

La comprensión de la interacción suelo-clima-vegetación-hombre es esencial para el desarrollo, la utilización, la gestión y el mejoramiento de los recursos

naturales. Es sobre esta base que el libro plantea las recomendaciones tanto para orientar la investigación científica-técnica futura, como para aplicar las experiencias exitosas obtenidas en procura de impulsar una producción agropecuaria sostenible en los suelos arcillosos y ácidos del Sistema de Riego de Santiago, ubicado en el piso templado andino del Sur del Ecuador.

La redacción es clara, precisa sin ser simplista; la abundante información numérica contenida en los cuadros, como las figuras (gráficos y fotografías) que enriquecen el libro, lo convierten en una herramienta muy valiosa para satisfacer las necesidades curriculares de estudiantes e investigadores interesados en las disciplinas de las ciencias del suelo, agronomía/horticultura, pastos y forrajes, ganadería bovina, riego y drenaje, climatología, hidrología y ciencias ambientales.

Ing. Antonio Gaybor Secaira

Decano de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central del Ecuador

Director Ejecutivo del Consorcio de Capacitación para el Manejo de los Recursos Naturales Renovables - CAMAREN -

Es una idea errónea y un mito que la productividad agrícola puede ser sostenida por la adición de fertilizantes y/o agua per se. Los insumos caros pueden ser fácilmente desperdiciados si las propiedades físicas del suelo son sub-óptimas o por debajo del nivel crítico. El uso eficiente de los recursos de agua y nutrientes depende de un nivel óptimo de propiedades y procesos físicos del suelo. En otras palabras, la productividad del manejo y funcionamiento de todos los ecosistemas depende en gran medida de la calidad del suelo y de su naturaleza dinámica.

Las propiedades físicas del suelo son ahora más importantes que nunca en el sostenimiento de la productividad agrícola debido a la disminución de la superficie mundial de tierras cultivables per cápita. Por lo tanto, preservar y restaurar los recursos del suelo mundial es crucial para satisfacer las demandas de la población actual sin poner en peligro las necesidades de las generaciones futuras

La sostenibilidad agrícola implica tendencias no negativas en la productividad, preservando al mismo tiempo la base de los recursos y manteniendo la calidad ambiental. No se puede insistir demasiado en el papel de la edafología física en el sostenimiento de la producción agrícola y en la preservación del medio ambiente.

Además, el manejo de la estructura del suelo, el control de la erosión y la restauración y recuperación de los suelos empobrecidos y los ecosistemas degradados, son estrategias importantes para mitigar el cambio climático global causado por el enriquecimiento atmosférico del CO₂.

Enmarcados en los conceptos anteriores, los autores del libro profundizan en la caracterización de las propiedades físicas e hidrodinámicas de los suelos de sitios representativos de la combinación de formas del terreno y de uso actual, predominantes en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago. A partir de esta base, desde una aproximación holística e interdisciplinaria,

proponen las directrices, tanto para la investigación científico-técnica, como para la introducción de prácticas de manejo probadas para enfrentar los procesos identificados de degradación de los suelos (erosión, anegamiento, compactación, deslizamientos en masa), y optimizar el uso del agua de riego en la producción sostenida de pastos y cultivos hortícolas, que también serían aplicables a condiciones agroecológicas similares del piso templado andino de los Andes del sur del Ecuador.

A más de su elevado y coherente contenido científico-técnico de los cuatro capítulos del libro, en la sección de la descripción del escenario físico, social y ambiental del Sistema de Riego Santiago, los autores resaltan los diversos problemas, sociales, técnicos y ambientales, que se generan en la agricultura irrigada, cuando debido a la discontinuidad de las políticas de desarrollo de las instituciones involucradas, los proyectos quedan incompletos, sin el acompañamiento técnico necesario, incluida la capacitación de los productores.

Con una presentación cronológica muy entusiasta, un texto muy legible y bien ilustrado, una sección refrescante y muy necesaria que cubre las bases de la física del suelo, del riego presurizado y la recuperación y manejo de las pasturas, el libro será una lectura esencial para profesores, estudiantes, investigadores y todos aquellos que deban enfrentar el desafío de promover la producción agropecuaria sostenible. Felicitaciones a los autores por un trabajo bien realizado.

Dr. Max González Merizalde

ex-Rector de la Universidad Nacional de Loja

El primero de los ocho Objetivos del Milenio (ODM), acordados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) contempla *erradicar la pobreza extrema y el hambre*, siendo una de sus metas reducir a la mitad, entre 1990 y 2015 la proporción de personas que padecen hambre. Si bien es cierto se logró cumplir con el porcentaje mencionado, aún existen 795 millones de personas con nutrición insuficiente (780 millones viven en los países en desarrollo). En el Ecuador, la desnutrición crónica en preescolares está alrededor de 25% con porcentajes más elevados en las zonas rurales y en grupos pertenecientes a poblaciones nativas.

Entre las “lecciones extraídas” de los ODM, se considera en primer lugar a la mejora de la productividad agrícola, especialmente de los pequeños campesinos y los agricultores familiares, como uno de los factores que conduce a logros importantes en la reducción del hambre y la pobreza.

En el 2015 y luego de evaluar los resultados de los ODM, los 193 países miembros de la ONU aprobaron los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, entre los que se destaca el de poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible (Objetivo2); se enfatiza en que se “trabaja para asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y aplicar prácticas agrícolas que aumenten la productividad y contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas”.

La complejidad política, social, económica y cultural que entraña la seguridad alimentaria de la población en todo el mundo, tiene como uno de sus componentes fundamentales, la producción de alimentos.

A este componente fundamental, los profesionales Luis Valarezo Manosalvas, Carlos Valarezo Manosalvas y Mario Mancino Valdivieso, con mucha prolijidad y sapiencia, presentan su aporte con el trabajo: *Producción Agropecuaria Sostenible en Suelos Arcillosos del Piso Templado Andino del Sur del Ecuador: Caso Sistema de Riego Santiago*. Los antecedentes y el contexto sucintamente reseñado en los párrafos iniciales, dotan a esta publicación de pertinencia, significancia y vigencia, ya que pese a los progresos alcanzados, queda mucho

por hacer para conseguir erradicar el hambre y alcanzar plenamente la seguridad alimentaria.

Además, el presente trabajo se constituye también en un referente teórico y metodológico muy importante; las bases conceptuales científicas que lo sustentan son una fuente actualizada de consulta obligatoria en las carreras profesionales del campo ambiental y agropecuario; el diseño metodológico que identifica con claridad la problemática en su multidimensionalidad, que utiliza procedimientos y técnicas adecuadas para describir y analizar la problemática y construye propuestas de solución con los actores del mundo de la vida de la producción, no pueden dejar de ser tomados en cuenta como referentes para el desarrollo de otras investigaciones, en campos de igual o mayor amplitud que el abordado; y, por último, los resultados tienen una gran importancia para su aplicación en la producción agropecuaria de calidad, tanto en la zona de desarrollo del estudio, como en otros similares del país y de toda la región andina.

Ojalá los organismos relacionados con las propuestas del presente trabajo aprovechen los resultados obtenidos; la academia para enriquecer los procesos de formación y el desarrollo de nuevas investigaciones, los organismos de desarrollo a nivel local y nacional para apoyar procesos de producción que tengan evidencia científica con pertinencia social, y por fin, las comunidades productivas, cuya misión es obtener una alimentación que garantice y contribuya a su propio bienestar y el de otros sectores poblacionales que reciben directamente el producto de sus esfuerzos.

Prefacio

El suelo es el substrato básico de toda forma de vida terrestre, puesto que sirve no solamente como medio para el crecimiento de las plantas y la actividad microbiana, sino también como medio de reciclaje para muchos productos de desecho, que de otra manera se acumularían y envenenarían el medio ambiente.

El crecimiento de las plantas terrestres depende del suelo en cuanto a: una reserva suficiente de nutrientes y agua, un adecuado espacio poroso para la extensión de las raíces y para el intercambio gaseoso entre el O₂ y el CO₂ (resultante de la respiración); y, un ambiente confortable, lo que significa estar libre de factores inhibidores del crecimiento, como, por ejemplo, una excesiva acidez o una concentración tóxica de sales solubles.

El suelo y el agua constituyen la base de la producción agropecuaria de todo país, por lo tanto, un manejo racional de estos recursos, demanda una total comprensión de la problemática multidimensional del riego en los ámbitos social, técnico, organizativo, legal, económico, de género y ambiental.

Desafortunadamente, la mayor parte de los sistemas de riego en Ecuador tienen serias deficiencias en la aplicación del agua a los cultivos, frecuencia y tiempos de riego; carencias en el manejo, operación y mantenimiento, lo cual genera: un inapropiado uso y manejo del suelo y el agua, conflictos sociales y una baja producción y productividad. Los factores involucrados en esta problemática son: errada concepción del diseño y construcción de la infraestructura hidroagrícola, como resultado de un modelo tecnicista y vertical por parte del Estado; y, la ausencia o debilitamiento de la organización social.

La Región Sur del Ecuador (RSE)¹ corresponde a la parte meridional del territorio ecuatoriano, y cubre una superficie de 27 835 km² equivalente al 9,8 % de la extensión continental del país. Se la denomina Región de los Andes Bajos, debido a que su altitud oscila entre el nivel del mar hasta 3 600 m s. n. m. (en la cordillera de Sabanilla), por lo que presenta menores altitudes en relación con la parte media y norte de la cordillera de Los Andes ecuatorianos. Sus cadenas montañosas pierden la forma característica del callejón interandino, dispersándose a partir del Nudo del Azuay en un laberinto de intrincadas pequeñas cordilleras, que descienden hacia el océano Pacífico en el Oeste y

1 Comprende las provincias de Loja, El Oro y Zamora Chinchipe.

hacia la cuenca Amazónica en el Este, para nuevamente ascender en el Sur en la sierra peruana. También, por la ausencia de volcanes, desaparecen los recubrimientos volcánicos del cuaternario (cenizas y cangahuas), lo que determina, que, al haberse sus suelos formado de rocas metamórficas e ígneas y sedimentos lacustres, sean completamente diferentes a los de la sierra ecuatoriana media y norte.

En la Sierra Andina Media Alta del cantón Loja, provincia de Loja, que comprende el piso altitudinal entre 1 800 a 2 800 m s. n. m. (piso templado andino), la distribución de la precipitación anual es bimodal, con un máximo en marzo (137 mm) y un mínimo en julio (15 mm); sin embargo, aún en las temporadas lluviosas, frecuentemente el intervalo entre las precipitaciones es mayor a quince días, afectando negativamente el desarrollo de la vegetación, lo que determina que sea necesario disponer de agua de riego para asegurar una producción agropecuaria sostenida y de alto rendimiento.

En este contexto, como parte de un conjunto de 30 proyectos que conformaban el Plan de Riego de la Provincia de Loja, figuraba el Proyecto de Riego Santiago, concebido para, abasteciéndose del sistema hidrológico del río Santiago, dotar de agua de riego a las áreas dispersas de: Salapa, La Tenería, La Banda y Motupe, de la parroquia El Valle, al noroeste de la ciudad de Loja.

En 1975 la extinta Subcomisión Ecuatoriana - PREDESUR llevó a cabo el Estudio de Factibilidad del Proyecto de Riego Santiago, con la finalidad de disponer de un instrumento preciso para sus decisiones técnicas y siguientes trabajos, aprovechando los estudios anteriores realizados, tanto por el H. Consejo Provincial de Loja, como por el desaparecido Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI).

Posteriormente, en 1987 PREDESUR inició la construcción de la infraestructura de riego en el área de Salapa, consistente en: 1.- un reservorio de 15 000 m³ en una depresión natural en la hacienda de la familia Burneo - Burneo, que se abastecía de los excedentes captados en la quebrada de Caigua y, 2.- una tubería principal y algunas tuberías secundarias. Quince años después; esto es, en marzo de 2002, el área de riego de Salapa se constituyó como parte de la Junta 2 del Sistema de Riego Santiago.

En 1988, al asumir la conducción del país el Presidente Rodrigo Borja, se cambiaron los directivos de PREDESUR y se produjo la discontinuidad de

la política pública de desarrollo agropecuario de la zona, lo cual significó la implementación parcial de la infraestructura para el riego presurizado, sin haberse completado todo el proyecto, incluyendo el diseño del riego parcelario y la capacitación de los productores sobre el manejo del riego. Ello determinó que los usuarios del Sistema de Riego Santiago, por su propia iniciativa procedieran a instalar tuberías para la conducción del agua desde las redes terciarias a sus parcelas y adquirieron en el mercado local los aspersores, microaspersores y goteros, a criterio del vendedor, sin observar, entre otros aspectos, las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y sus características hidrodinámicas, las condiciones climáticas, los requerimientos hídricos de los cultivos, la carga hidráulica disponible, la velocidad y dirección del viento, y el caudal asignado.

Consecuentemente, la práctica del riego se la realiza sin ninguna base técnica, generando por un lado un riego excesivo, con la concomitante pérdida de agua, alta escorrentía superficial y erosión de los suelos en los terrenos inclinados, anegamiento en las partes planas, deslizamientos en masa en algunos sectores, pérdida de nutrientes por lixiviación, contaminación de las aguas subterráneas y aumento de la incidencia de enfermedades de los cultivos. En cambio, en otros terrenos, riego insuficiente con el concomitante estrés de las raíces para mantener la tasa de transpiración, y con ello, escaso desarrollo de la planta y reducción de la producción.

El Sistema de Riego Santiago es de particular importancia, por cuanto es el único en su tipo en la provincia de Loja, concebido y en operación para regar por presión (aspersión, micro aspersión y goteo), cuya carga hidráulica se genera por la diferencia de nivel entre las redes terciarias, el reservorio y las parcelas de cultivo, siendo obligatorio para sus usuarios el uso de esta tecnología de riego. Consecuentemente, constituye un referente para la tecnificación de los demás sistemas de riego de la provincia, en donde predomina la tradición del riego superficial (surcos) a pesar de que el territorio está dominado por una topografía muy irregular, en el cual debería ser mandatorio manejar muy cuidadosamente los suelos y el agua de riego, para evitar su degradación y desperdicio, respectivamente.

Frente a la realidad enunciada, con la finalidad de disponer de referentes para orientar el manejo sostenido de los recursos suelo y agua, entre agosto de 2013 y mayo de 2014, el ingeniero Luís Valarezo Manosalvas, con la asesoría

del ingeniero Carlos Valarezo Manosalvas (ambos docentes-investigadores de la Universidad Nacional de Loja), desarrolló el proyecto de investigación denominado: *Influencia del uso del suelo y la Pendiente del Terreno sobre el Comportamiento Hidrodinámico del Suelo en el Área de Riego de Salapa*, en el que se estudiaron: 1.- las características físico-químicas de los suelos (textura, estructura, profundidad efectiva, reacción, acidez y contenido de materia orgánica); 2.- las características hidrodinámicas expresadas en: infiltración, conductividad hidráulica saturada y retención de humedad para diferentes tensiones; y, los procesos de degradación (erosión, escorrentía, compactación). A partir de esta información se derivaron los siguientes parámetros de los suelos: 1.- capacidad de almacenamiento y disponibilidad de agua para los cultivos; 2.- capacidad de aireación y por ende de provisión de oxígeno a las raíces; 3.- condiciones físicas para el crecimiento de las plantas.

Los resultados de la investigación evidenciaron que los suelos son predominantemente arcillosos, de lenta infiltración, baja permeabilidad y muy escasa aireación. Están afectados por procesos de erosión, compactación, anegamiento, y deslizamientos en masa, debido a que su manejo para la producción agropecuaria (hortalizas y ganadería bovina) dista de ser técnicamente adecuado.

Considerando la importancia y trascendencia de que la información generada sea difundida y aplicada prácticamente, los investigadores antes mencionados invitaron al ingeniero Mario Mancino Valdivieso, profesional de amplia experiencia en el manejo de pastos y la ganadería en el área de Salapa y Asesor de la Sección de Desarrollo Productivo del H. Consejo Provincial de Loja, para que se integre al equipo de trabajo, en la perspectiva de conjuntamente proponer las recomendaciones sobre el manejo eficiente de los recursos suelo y agua para la producción sostenible de pastos y hortalizas en las áreas del Sistema de Riego Santiago, fundamentadas científica y técnicamente, y en concordancia con el entorno biofísico, socio-económico y cultural prevaleciente, de la única zona declarada de uso agrícola y ganadero del cantón Loja, según ordenanza del Concejo Cantonal del 15 de marzo del 2008.

El libro se lo ha titulado *Producción Agropecuaria Sostenible en Suelos Arcillosos del Piso Templado Andino del Sur del Ecuador: Caso Sistema de Riego Santiago*. Su estructura consta de los siguientes capítulos: 1.- Marco Conceptual (estado del arte) sobre las características físico-químicas e hidrodinámicas de los suelos,

y los procesos de compactación por efecto de la ganadería; 2.- Descripción del Sistema de Riego Santiago (aspectos biofísicos, infraestructura hidráulica, socio-organizativos y riego parcelario); 3.- Comportamiento hidrodinámico de los suelos del área de riego de Salapa en relación al uso del suelo y al rango de pendiente, incluyendo las características morfológicas y físico-químicas; 4.- Recomendaciones técnicas para el aprovechamiento sostenible del suelo y el agua para los dos usos de la tierra identificados; y, 5.- Bibliografía. Al final se presenta una sección de anexos.

Los autores aspiran que los conocimientos que se exponen en este libro sirvan para: 1.- orientar la investigación científico-técnica dirigida a generar conocimientos para el aprovechamiento sostenido del suelo y el agua, y procurar los más altos rendimientos de la producción agropecuaria, minimizando a la vez los impactos ambientales de la misma en este tipo de agro-ecosistema y mejorando la regulación hídrica de las microcuencas; 2.- ser insumos de estudio en las carreras de las ingenierías agronómica, agrícola, forestal, gestión del medio ambiente ;y, medicina veterinaria y zootecnia; 3.- constituir referentes científico-técnicos para los profesionales relacionados con los campos indicados y los productores en general, ya sea del Sistema de Riego Santiago u otros sistemas de riego de características agroecológicas y socioeconómicas similares.

Preface

Soil is the basic substrate of all terrestrial life forms, serving not only as a medium for plant growth and microbial activity, but also as a means for recycling many waste products, which would otherwise accumulate and poison the environment.

The growth of continental plants depends on the soil in terms of: a sufficient reserve of nutrients and water; an adequate pore space for root extension and for the gas exchange between O₂ and CO₂ (resulting from respiration); and a comfortable environment, which means being free of growth inhibiting factors such as excessive acidity or a toxic concentration of soluble salts.

In every country, soil and water form the basis for agricultural production; therefore, a rational management of these resources requires a full understanding of the multidimensional problem of irrigation in the social, technical, organizational, legal, economic, of gender and environmental aspects.

Unfortunately, most of the irrigation systems in Ecuador have serious deficiencies in the application of water to crops, frequency and times of irrigation; lack of management, operation and maintenance, which generates: inappropriate use and management of soil and water, social conflicts and low production and productivity. The factors involved in this huge problem are: misconception of the design and a vertical model applied in the construction of the hydro-agricultural infrastructure, and the absence or weakening of social organization.

The Southern Region of Ecuador (RSE)² corresponds to the southern part of the Ecuadorian territory, covering an area of approximately 27 835 km², equivalent to 14% of the country's land. It is called the Region of the Low Andes because its highest altitude is 3,600 m asl at the Sabanilla range. It has lower altitudes in relation to the middle and north of the mountain range of the Ecuadorian Andes.

Its mountain ranges lose the characteristic form of the inter-Andean valley, dispersing from the Nudo del Azuay in a labyrinth of intricate small mountain

² It includes Loja, El Oro and Zamora Chinchipe provinces

ranges, descending towards the Pacific Ocean in the West and towards the Amazon basin in the East, then ascend towards the South in the Peruvian highlands. Due to the absence of volcanoes, the quaternary volcanic deposits (ash and cangahuas) disappear. This determines that they, having formed from metamorphic and igneous rocks and lacustrine sediments, are completely different from those of the middle and north Ecuadorian sierra.

In the Andean highlands of the canton Loja, province of Loja, which includes the altitudinal belt from 1800 m asl to 2800 m asl (Andean Temperate), the annual precipitation distribution is bimodal, with a maximum in March (137 mm) and a minimum in July (15 mm). Nevertheless, even in the rainy periods, the interval between rainfall is often greater than fifteen days, adversely affecting the development of vegetation, being necessary to have irrigation water to ensure a high agricultural yield.

In this context, as part of a set of 30 projects that comprised the Irrigation Plan of the Province of Loja, there was the Santiago Irrigation Project, designed to provide irrigation water to the dispersed areas of Salapa, La Tenería, La Banda and Motupe, belonging to parish El Valle, at the northeast of the city of Loja.

In 1975, the defunct Subcomisión Ecuatoriana - PREDESUR, carried out the Feasibility Study of the Santiago Irrigation Project, with the purpose of having precise information for its technical decisions and following works, taking advantage of previous studies carried out by both H. Consejo Provincial de Loja, and the dissolved Ecuadorian Institute of Hydraulic Resources (INERHI).

Subsequently, in 1987, PREDESUR began the construction of the irrigation infrastructure in the Salapa area, consisting of:

- a reservoir of 15 000 m³ in a natural depression at the Burneo-Burneo family farm, which was supplied by the surpluses water captured in the Caigua ravine,
- a main pipeline and some secondary pipelines, of which the users, downstream, derive pressurized water, supplied by a hydraulic head generated by the level difference between the reservoir and the irrigation plots.

Fifteen years later, that is, in March 2002, the irrigation area of Salapa was added as part of Board 2 of the Santiago Irrigation System.

In 1988, when President Rodrigo Borja assumed the leadership of the country, PREDESUR's managers changed and there was a discontinuity of public agricultural development policy in the area. This meant only partial implementation of the infrastructure for pressurized irrigation, without completion of the whole project, including the irrigation plot design and the training of producers on the management this new irrigation technic.

In view of this, users of the Santiago Irrigation System, on their own initiative, installed pipes to convey water from the tertiary networks to their plots and acquired from local market sprinklers, micro sprinklers and drippers. This was done at seller's discretion, without observing, among other aspects, the physical, chemical and biological properties of the soil, and its hydrodynamic characteristics, the climatic conditions, the water requirements of the crops, the available hydraulic load, the speed and direction of the wind, and the assigned flow.

Consequently, the practice of irrigation is carried out without any technical basis, generating on the one hand excessive irrigation with the concomitant loss of water, runoff and erosion in the sloping terrains, flooding in the lower flat parts, landslides in some sectors, nutrient lixiviation, pollution of groundwater and an increase in the incidence of crop diseases. Meanwhile, in other areas, insufficient irrigation with the concomitant stress of the roots to maintain the rate of transpiration, and with it, scarce development of the plant and reduction of production.

The Santiago Irrigation System is of particular importance, since it is the only one of its kind in the province of Loja, conceived and in operation to irrigate by pressure (spraying, micro sprinkling and dripping), whose hydraulic load is generated by the level difference between the tertiary networks, the reservoir and the cultivation plots, being mandatory the use of this technology for its users. Therefore, it is a reference for the technical improvement of the other irrigation systems of the province, where surface irrigation (furrows) still predominates, although the territory is dominated by an irregular topography, in which it should be compulsory to handle very carefully soils and irrigation water, to avoid degradation and waste.

In the face of the aforementioned reality, in order to provide references to guide the sustained management of soil and water resources, between August 2013 and May 2014, engineer Luis Valarezo Manosalvas, with the assistance of engineer Carlos Valarezo Manosalvas (both professor-researchers at the National University of Loja), developed the research project called *Influence of Land Use and Land Slope on Hydrodynamic Soil Behavior in the Irrigation Area of Salapa*, in which they studied:

- the physical and chemical characteristics of soils (texture, structure, acidity, organic matter content),
- the hydrodynamic characteristics expressed in: infiltration, saturated hydraulic conductivity and moisture retention for different stresses, and
- the processes of degradation (erosion, runoff, compaction).

From this information, the following parameters of the soils were derived:

- storage capacity and water availability for the crops,
- aeration capacity and therefore oxygen supply to the roots,
- physical conditions for the growth of plants.

The results showed that the soils are predominantly clay, with slow infiltration rate, low permeability and very poor aeration. Because their management for agricultural production (vegetables and cattle), in most cases, is far from being technically adequate, they are affected by processes of erosion, compaction, waterlogging, and landslides.

Considering the importance of disseminating and practically applying the generated information, the researchers invited engineer Mario Mancino Valdivieso to join the work team because of his extensive professional experience in the management of pastures and livestock in the area of Salapa and Adviser of the Productive Development Department at the Consejo Provincial de Loja. We worked together in constructing and proposing recommendations on the sustainable management of soil and water resources for the production of pastures and vegetables in the areas of the Santiago Irrigation System. These were scientifically and technically based, and in accordance with the prevailing biophysical, socio-economic and cultural conditions of the only declared area

of agricultural and cattle use of canton Loja, by the ordinance of the Cantonal Council of March 15th, 2008.

The book has been titled *Sustainable Agricultural Production in Clay Soils of the Andean Temperate Belt of the South of Ecuador: Case Santiago Irrigation System*, and consists of the following chapters:

- Conceptual framework (state of the art) on the physical-chemical and hydrodynamic characteristics of the soils, and the compaction processes due to the effect of livestock,
- Description of the Santiago Irrigation System (biophysical aspects, hydraulic infrastructure socio-organizational and plot irrigation);
- Hydrodynamic behavior of the soils of the Salapa area in relation to land use and slope range, which includes their morphological and physicochemical characteristics,
- Technical recommendations for sustainable use of soil and water for the two identified land uses,
- Bibliography,
- Annexes.

The authors hope that the knowledge contained in this book will serve to orient future scientific-technical research aimed at generating information for sustainable use of soil and water. This information will serve to assist in getting the highest yields of agricultural production, minimizing at the same time their environmental impacts on this agro-ecosystem, and improving the hydrological regulation of the micro-watersheds. It will become study material for agricultural, agronomical, forest, and environmental management engineering. Veterinary medicine and zootechnical careers will benefit as well. It will constitute a scientific-technical reference for professionals related to the fields and producers in general, either from the Santiago Irrigation System or other irrigation systems with similar agroecological and socioeconomic characteristics.

1

Marco Conceptual

1.1. Propiedades físicas y químicas del suelo que influyen en la dinámica del agua

El suelo es una entidad dinámica, constantemente en busca de un estado de equilibrio, ya que alternativamente se moja y se seca, se hincha y se encoge, endurece y suaviza, calienta y enfría, congela y deshela, compacta y se raja, absorbe y emite gases, adsorbe y libera iones intercambiables, precipita y disuelve sales, se vuelve ácida o alcalina, y presenta condiciones aerobias o anaeróbicas lo que conduce a un ambiente de oxidación o reducción química (Hillel, 2004).

El suelo es un sistema disperso constituido por tres fases, la proporción de las mismas en volumen es idealmente la siguiente: sólida (45% de partículas minerales y 5% partículas orgánicas); líquida (25% de agua con elementos en disolución); y, gaseosa (25%: principalmente O_2 y CO_2), y una extensa población microbiana y de pequeños invertebrados (insectos, nematodos, etc.), cuya actividad afecta a sus propiedades físicas y químicas (Jordan, 2010; Silva *et al.*, 2015). A continuación, se revisan las propiedades físicas y químicas que influyen en la dinámica de las fases líquida y gaseosa del suelo.

1.1.1. Textura

La porción mineral es la predominante en el suelo y está formada por partículas de diversas formas, tamaños y composición química, las mismas que se las separa en dos grandes grupos, la fracción denominada tierra fina (pasa por un tamiz de 2,0 mm de malla) y la fracción gruesa (Navarro y Navarro, 2013). En base al tamaño de las partículas la tierra fina se divide en arena, limo y arcilla (Schaetzl y Anderson, 2009). Según el Departamento de Agricultura

de los Estados Unidos de América (USDA, 1999), la arena corresponde a las partículas con diámetro equivalente de 2,00 - 0,05 mm; el limo de 0,05 - 0,002 mm; y, la arcilla menor de 0,002 mm.

Los elementos gruesos son fragmentos de roca de tamaño superior a 2,0 mm y se dividen en gravilla (0,2 - 0,6 cm); grava (0,6 - 6,0 cm); cantos (6,0 - 25 cm) ;y, bloques (25 - 60 cm y mayores) (Porta *et al.*, 2014). Cuando éstos están presentes en cantidades apreciables se anotan en el nombre de la clase textural en forma complementaria: gravilloso, esquistoso, pizarroso o pedregoso (Valarezo, 2012).

La clase textural a la que pertenece un suelo se determina con la ayuda del triángulo de textura, en el cual se ubican los porcentajes de arena, limo y arcilla (Andrades y Martínez, 2014). Consecuentemente, la textura hace referencia a la composición granulométrica de la fracción inorgánica de la tierra fina del suelo (Porta *et al.*, 2008).

La textura del suelo depende de la naturaleza del material parental y de los procesos de evolución del suelo, siendo el resultado de la acción e intensidad de los factores de formación de suelo (Navarro y Navarro, 2013). Atendiendo a su textura los suelos se clasifican en arenosos, limosos y arcillosos, según la fracción que predomine (Fuentes y García, 1999).

En la mayoría de los suelos las fracciones de arena y limo consisten principalmente de cuarzo y feldspatos, y cantidades menores de otros minerales primarios tales como micas, piroxenos, anfíboles y olivino (Bashour, 2011). Las arcillas son minerales secundarios que se han formado de la meteorización de los minerales primarios, debido a su gran área superficial por unidad de masa, determinan fuertemente el comportamiento y la actividad físico-química del suelo (White, 2006).

Mineralógicamente las arcillas pueden ser filosilicatos cristalinos (caolinita, vermiculita, etc.), o aluminio-silicatos amorfos (alofana, imogolita), también pueden ser óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, amorfos o en diferentes grados de cristalización (hematita, limonita, goethita) (Lafranco *et al.*, 2014).

Los suelos de textura arcillosa tienen un gran número de microporos, mientras que los macroporos predominan en los suelos de textura arenosa (Fuentes, 2003). Es por ello que la textura influye decisivamente sobre otras propiedades

del suelo, tales como: estructura, color, porosidad, consistencia, intercambio de fluidos (aireación y permeabilidad), grado de hidromorfía, retención de agua y nutrientes, penetración de las raíces y fertilidad (Jordán, 2010).

La textura gobierna en gran medida el área superficial del suelo, la cual retiene agua, cationes, aniones y nutrientes. También, ésta adquiere revestimientos que le imparten el color al suelo. El área superficial se incrementa al disminuir el tamaño de las partículas, siendo especialmente alta en los suelos de textura fina (arcillosos), los cuales químicamente son los más reactivos y retienen más agua que los arenosos (Schaetzl y Anderson, 2009).

Las clases texturales resultan de la combinación de las tres fracciones de la tierra fina (arena, limo y arcilla), cuya categorización se presenta en el Cuadro 1 (USDA, 2017):

Cuadro 1. Clases texturales del suelo

Tipo de Suelo	Textura	Nombre de la clase
Arenoso	Gruesa	Arenoso y Arenoso franco
	Moderadamente Gruesa	Franco arenoso
Franco	Media	Franco, Franco limoso y Limoso
	Moderadamente Fina	Franco arcilloso, Franco arcillo arenoso y Franco arcillo limoso
Arcilloso	Fina	Arcilloso, Arcillo arenoso y Arcillo limoso

1.1.2. Estructura

La estructura se refiere a los agregados relativamente estables del suelo que resultan del arreglo espacial de las partículas arena, limo y arcilla, más la materia orgánica humificada (Easton y Bock, 2016). Un agregado es una unidad tridimensional de estructura del suelo, que resulta de la unión de partículas individuales por procesos naturales (Porta *et al.*, 2014), tales como, reordenamiento, floculación y cementación de las partículas, mediados por el carbono orgánico, la biota, los puentes iónicos (fuerzas de cargas eléctricas) y los carbonatos (Bronick y Lal, 2004; Sierra *et al.*, 2011).

La estructura del suelo ejerce importantes influencias sobre las condiciones edáficas y el medio ambiente (White, 2006). A menudo se expresa como el grado de estabilidad de los agregados, lo cual depende de la textura, el tipo de

arcilla, la clase de iones asociados a las arcillas, la materia orgánica y la actividad microbiana del suelo (Santa Olalla *et al.*, 2005).

Los agregados más estables se forman cuando el área superficial de la fracción coloidal del suelo (arcilla y humus) tiene una elevada saturación de iones calcio, aunque los iones aluminio también pueden tener influencia; en cambio, la saturación con iones sodio dará como resultado agregados inestables que fácilmente se dispersan (Valarezo, 2012).

Los suelos arcillosos que no presentan una estructura pedológica se los denomina masivos; en cambio, a aquellos arenosos sin estructura se los llama de grano suelto (Schaetzl y Anderson, 2009).

Excepto para los suelos de textura arenosa (gruesa), en los cuales su baja capacidad de retención de humedad es su principal desventaja, es evidente que las características de una mala estructura del suelo a menudo son: baja aireación, alta compactación, baja conductividad hidráulica y pobre penetración de raíces (Navarro y Navarro, 2013).

Las principales causas que degradan la estructura del suelo son: los aguaceros con grandes gotas, las cuales en los suelos desnudos destruyen los agregados; la dilución de los cationes (Ca^{++} y Mg^{++}) que favorecen la floculación de los coloides (arcilla y humus); la pérdida de materia orgánica; y, la acidificación y/o descalcificación del suelo (Jordán, 2010).

Complementariamente, el laboreo excesivo o inadecuado; la compactación por efecto del uso de maquinaria agrícola pesada y el sobrepastoreo en suelos con alto contenido de humedad (Porta *et al.*, 2014).

1.1.3. Porosidad, densidad real y densidad aparente

La porosidad es un índice del volumen relativo de poros en el suelo. Este valor se encuentra por lo general en el rango de 30 - 60 % (White, 2006). Los poros son las vías por los cuales el agua penetra y circula en el suelo. Muchos de ellos se encuentran conectados entre sí formando verdaderos canales. El aire que contiene el oxígeno necesario para las raíces de las plantas se encuentra llenando parcialmente dichos espacios junto al agua (Navarro y Navarro, 2013).

La geometría del sistema poroso del suelo es tan compleja como su fase sólida, dado que las partículas varían en tamaño, forma, regularidad y tendencia al

hinchamiento. Consecuentemente, los poros difieren grandemente unos de otros en cuanto a la forma, dimensiones laterales, longitud, sinuosidad, coherencia y otras características (Porta *et al.*, 2008).

Los suelos de texturas gruesas tienden a ser menos porosos que aquellos de texturas finas, aunque el tamaño promedio de los poros individuales es mayor en el primero que en el segundo tipo de suelo (Easton y Bock, 2016).

La importancia agrícola de la porosidad del suelo es muy significativa, sus características dependen de la textura, estructura, contenido de materia orgánica, tipo e intensidad de cultivos, labranza y otras propiedades del suelo y su manejo (Phogat *et al.*, 2015). La reducción de la porosidad del suelo determina una menor aireación, menor capacidad de infiltración de agua, dificultad para la penetración de las raíces, mayor escorrentía en los suelos inclinados y anegamiento superficial en las áreas planas (Gómez, 2011).

En la caracterización de la porosidad del suelo se pueden evaluar dos parámetros: la porosidad total y la distribución de los poros en rangos de tamaños definidos (Valarezo, 2012).

La porosidad total es el volumen de suelo que ocupan normalmente el agua y el aire del mismo. Se define como la relación entre el volumen de poros y el volumen total del suelo. Se expresa habitualmente en porcentaje y se calcula mediante la siguiente fórmula (Hillel, 2004):

$$P (\%) = VP/VT \times 100$$

De donde:

P = Porosidad (%)

VP = Volumen de poros (L³)

VT = Volumen total del suelo (L³)

El suelo ideal es el que tiene el espacio poroso dividido por igual entre poros grandes, medianos y pequeños, por lo que presentará las mejores condiciones para una buena aireación, permeabilidad y retención de agua (Navarro y Navarro, 2013).

Los poros se pueden clasificar en base a su tamaño, morfología y funcionalidad. Debido a que el suelo es un medio heterogéneo, constituido por partículas

heterométricas (distintos tamaños), por lo general unidas formando agregados, las dimensiones de los poros no son uniformes (Porta *et al.*, 2014).

En el suelo se distinguen tres tipos de porosidad: macro, meso y microporosidad. La primera corresponde al porcentaje del volumen de poros ocupado por la fase gaseosa (aire del suelo) cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, involucra los poros grandes ($> 30 \mu\text{m}$), los cuales están asociados a los procesos de infiltración, aireación y drenaje del agua (Donado, 2004). Los mesoporos ($30 - 10 \mu\text{m}$), son importantes para el crecimiento de las plantas ya que retienen el agua aprovechable (Jordán, 2010), están influenciados por el tamaño de las partículas, su distribución, el contenido de materia orgánica y la mineralogía de arcilla (Lal y Shukla, 2005). La microporosidad, corresponde a los poros más pequeños ($10 - 0,2 \mu\text{m}$), los cuales retienen el agua con mucha fuerza, de manera que no puede ser utilizada por las plantas (Navarro y Navarro, 2013), están esencialmente siempre llenos de agua, inaccesibles para los microorganismos y pueden ser estratégicamente útiles en el secuestro de carbono del suelo (Schaetzl y Anderson, 2009).

La distribución del tamaño de los poros se estima a partir de los volúmenes de agua que se extraen a diferentes rangos de succión de muestras inalteradas de suelo saturado, con cuyos valores se grafica la curva de retención de agua del suelo o curva del pF (White, 2006).

La porosidad está relacionada con dos parámetros característicos: la densidad real y la densidad aparente (Schaetzl y Anderson, 2009).

La **densidad real del suelo (Dr)**: llamada también peso específico real o densidad de los sólidos, es la relación entre la masa de suelo seco y su volumen (Chaudhari *et al.*, 2013).

$$Dr = Ms/Vs$$

De donde:

Dr = densidad real (M L^{-3})

Ms = Masa de suelo seco (M)

Vs = Volumen de sólidos (L^3)

La densidad real de la mayoría de los suelos es prácticamente constante ($2,65 \text{ g cm}^{-3}$), debido a que el cuarzo tiene una densidad real de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, siendo el

mismo uno de los minerales dominantes en los suelos. Sin embargo, los valores promedio de densidad real de la arcilla y la materia orgánica son $2,83 \text{ g cm}^{-3}$ y $0,8 \text{ g cm}^{-3}$ respectivamente, por lo que los suelos con cantidades significativas de estos componentes se desviarán del valor de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ (Easton y Bock, 2016).

La **densidad aparente del suelo (Da)**: es la relación entre la masa de suelo seco y el volumen total (Porta *et al.*, 2008).

$$Da = Ms/Vt$$

De donde:

Da = Densidad aparente (M L^{-3})

Ms = Masa de suelo seco (M)

Vt = Volumen total (L^3)

Los valores de la Da oscilan entre $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ (suelos bien estructurados) y $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ (suelos compactados) (Jordán, 2010). La densidad aparente está influenciada por la textura, la cantidad de materia orgánica, los constituyentes minerales y la porosidad. De igual forma, la densidad aparente aumenta con la profundidad del perfil del suelo, debido a los cambios en el contenido de materia orgánica, la porosidad y la compactación (Chaudhari *et al.*, 2013).

Los suelos más sueltos y porosos tendrán una densidad aparente menor, ya que poseen mayor volumen que aquellos más compactos, donde las partículas están en íntimo contacto, de lo cual resulta un menor espacio poroso; y, consecuentemente, una densidad aparente mayor (Navarro y Navarro, 2013).

Un aumento en el valor de la densidad aparente se debe a la disminución del espacio poroso, producto de la compactación ocasionada principalmente por la utilización intensa e inadecuada de la maquinaria agrícola y el excesivo pastoreo de animales en suelos húmedos (Nawaz *et al.*, 2012).

El aumento de los valores de la densidad aparente puede presentar perjuicios tales como: demora en la emergencia de plántulas, plantas de menor altura, hojas con coloraciones no características, sistema radicular superficial, malformación radicular, formación de costra superficial del suelo, encharcamiento, erosión excesiva y aumento en la demanda energética para el laboreo (Smith *et al.*, 2005).

La porosidad del suelo también puede calcularse, a partir de los valores de la densidad real y la densidad aparente, de la siguiente manera: (Lafranco *et al.*, 2014).

$$P(\%) = 100 [1 - (Da/Dr)]$$

1.1.4. Acidez del suelo

La acidificación del suelo es el proceso por el cual aumenta la concentración de iones H^+ normalmente proveniente del Al intercambiable y de grupos orgánicos ácidos, alcohólicos y fenólicos (Usón *et al.*, 2010). El pH (potencial hidrógeno) indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en la solución del suelo, por lo que es una medida del grado de acidez o alcalinidad del suelo (Bast *et al.*, 2011). La escala de pH oscila de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidos los suelos con un pH menor a 7 y alcalinos aquellos con pH mayor a 7. Cuando el pH es de 7 el suelo es neutro (Geissert y Barois, 2012).

Las causas de la acidificación del suelo (aumento de la concentración de iones H^+ o pérdida de bases en la solución del suelo) pueden ser: precipitación ácida (iones H^+ que ingresan con la lluvia); deposición de gases o partículas acidificantes de la atmósfera, como el dióxido de azufre (SO_2), amoníaco (NH_3) y los ácidos nítrico y clorhídrico (HNO_3 ; HCl); la aplicación de fertilizantes acidificantes como las sales de azufre elemental (S), urea o amonio (NH_4^+) y el crecimiento de leguminosas como el trébol; la absorción de nutrientes por los cultivos y exudados de la raíz; y, la mineralización de la materia orgánica (Goulding, 2016). También, la acidificación se genera por la deprotonización parcial de las moléculas de agua coordinadas al aluminio intercambiable ($Al^{3+} \cdot 6H_2O$), así como, de grupos orgánicos ácidos, alcohólicos y fenólicos (Valarezo, 2012).

La acidificación reduce la disponibilidad de nutrientes en el suelo (P, Ca, K, Mg, etc.), promueve la movilidad de elementos tóxicos como el Al^{3+} , incrementa la movilidad de metales pesados y provoca variaciones en la estructura de la microflora y microfauna (Usón *et al.*, 2010).

La acidez actual corresponde a los iones H^+ que se encuentran libres en la solución del suelo, y es la que se determina al medir el pH con un potenciómetro. La acidez intercambiable es la suma de los iones H^+ y Al^{3+} que se encuentran neutralizando la carga eléctrica negativa de los coloides del suelo

(arcilla y humus), ésta se la extrae mediante una solución 1 N de KCL (Porta *et al.*, 2014).

Para reducir la acidez y elevar el pH del suelo hasta valores en los que los elementos tóxicos pierdan esta característica por insolubilización y los elementos esenciales presenten la mayor disponibilidad, se utiliza el encalado, que consiste en la aplicación al suelo de sales básicas (cualquier compuesto de calcio o de calcio y magnesio, conocidas como cales agrícolas) que sean capaces de generar iones OH⁻ a través de un proceso de hidrólisis (Navarro y Navarro, 2013).

1.1.5. Materia orgánica

La mayor parte de las funciones o procesos que ocurren en el suelo son condicionados por la naturaleza y la cantidad de materia orgánica que éste contenga, incidiendo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas; así, por ejemplo, la materia orgánica afecta la capacidad de retención de agua, dado que puede almacenar de 6 a 8 veces su masa en agua, lo que significa que el suelo es capaz de disponer de un mayor contenido de humedad para los cultivos (Ghisolfi, 2011).

La disminución del contenido de la materia orgánica va asociada a procesos de degradación del suelo (García, 2008). En cambio, un mayor contenido de materia orgánica favorece la formación de agregados estables (complejos arcillo-húmicos que actúan como núcleo de los agregados) y un aumento de la porosidad, que en conjunto mejoran la infiltración, la circulación y retención del agua, y la capacidad de aireación (Velasco, 2016).

Los componentes de la materia orgánica del suelo se pueden clasificar en consideración de: 1.- la composición química (carbono: 52 - 58%; oxígeno: 34 - 39%; hidrógeno: 3,3 - 4,8%; nitrógeno: 3,7 - 4,1%, y en menor proporción S, P, B, K, Ca, Mg, Fe y Mo, entre otros); 2.- la solubilidad y densidad (materia orgánica particulada, materia orgánica coloidal, materia orgánica disuelta y materia orgánica carbonizada); y, 3.- el grado de evolución que tiene la materia orgánica fresca y humificada (Porta *et al.*, 2014).

La descomposición de residuos de plantas y animales en el suelo constituye un proceso biológico básico en el ecosistema, en el que el carbono es recirculado hacia la atmósfera como dióxido de carbono (CO₂), el nitrógeno es mineralizado

a la forma amónica (NH_4^+) y posteriormente oxidado a nitrato (NO_3^-); en tanto que, otros elementos asociados (P, S y diversos micronutrientes) aparecen en la forma química requerida por las plantas superiores (Navarro y Navarro, 2013).

La dinámica de descomposición de la materia orgánica está determinada, por un lado, por una alteración mecánica por acción de la fauna y los microorganismos del suelo; y por otro, su continua transformación bajo la acción de factores de tipo biológico, físico y químico. Así, las moléculas orgánicas complejas (proteínas o polisacáridos) son degradadas para obtener moléculas más sencillas (aminoácidos u oligosacáridos) (Jordán, 2010).

El contenido de materia orgánica en el suelo, es un buen indicador de su fertilidad, principalmente de su capacidad potencial para proporcionar nutrientes a los cultivos. Además, tal contenido indica la capacidad relativa del suelo para retener nutrientes contra pérdidas por lixiviación; la estabilidad de su estructura y susceptibilidad a la erosión; el movimiento del agua y aire; la capacidad de amortiguamiento del suelo para resistir variaciones de salinidad; y, las condiciones de laboreo y manejo del suelo (Rodríguez y Rodríguez, 2011).

1.2. Contenido de agua del suelo

1.2.1. Importancia del agua del suelo y rango de contenido

El agua en el suelo se puede encontrar en tres formas: 1.- agua líquida que se transmite a través y que es retenida en los poros; 2.- agua absorbida que es retenida por las fuerzas de cohesión y adhesión sobre las partículas de suelo, en su mayoría partículas coloidales (arcilla y humus); y, 3.- agua que se encuentra dentro de la estructura reticular de los minerales arcillosos (Lal y Shukla, 2004).

La condición hídrica del suelo se caracteriza tanto por la cantidad de agua presente, como por su estado de energía, factores éstos que inciden directamente en muchos procesos biofísicos fundamentales (Monteith y Unsworth, 2013; Silva *et al.*, 2015), tales como: la germinación de las semillas, el crecimiento y la nutrición de las plantas, la descomposición microbiana de la materia orgánica, las transformaciones de nutrientes en la zona radicular (Bittelli, 2011); de igual forma, desempeña un papel clave en los procesos hidrológicos (Fuchsberger y Kirchengast, 2013).

El estado físico del suelo en cuanto a consistencia, plasticidad, penetrabilidad, traficabilidad y temperatura, es controlado por su contenido de humedad; así como, los procesos de hinchamiento y contracción asociados con la adición o extracción de agua en los suelos arcillosos (Lanfranco *et al.*, 2014). Además, el contenido de agua es determinante del contenido de aire y del intercambio gaseoso, lo cual tiene directa relación con la respiración de las raíces, la actividad de los microorganismos, y el potencial de óxido - reducción del suelo (Lal y Shukla, 2004). Consecuentemente, el adecuado manejo de suelo requiere un conocimiento preciso de la dinámica del agua en el mismo.

El agua del suelo transporta en disolución nutrientes, sales solubles, compuestos orgánicos solubles y contaminantes, así como materia en suspensión, permitiendo su absorción por las raíces (Hillel, 2004).

El contenido de agua del suelo se refiere a la cantidad de agua (masa o volumen) que se halla en un punto en un momento determinado, la cual presenta una variabilidad espacio - temporal muy marcada, dependiendo de la dinámica hídrica que tenga el sistema y de las propias características del suelo (Easton y Bock, 2016). Por consiguiente, el diseño, implementación, operación y mantenimiento de sistemas de riego eficientes, requieren del conocimiento de los procedimientos esenciales para controlar el movimiento y almacenamiento de agua en el suelo (Smith y Warrick, 2007).

El máximo contenido de agua del suelo, corresponde a la condición de saturación, que es aquella en la cual todos los poros están llenos de agua, su valor oscila de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en suelos arenosos a $0,60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en suelos arcillosos (Bittelli, 2011); en tanto que, el mínimo contenido, equivale a la condición variable de “seco al aire”. En su lugar se ha introducido el término arbitrario de “suelo seco a la estufa”, luego de haber sido secado a 105°C por 24 horas (Valarezo *et al.*, 1988).

1.2.2. Unidades del contenido de agua del suelo

El contenido de agua del suelo se puede expresar en tres formas: unidades de masa, unidades de volumen y unidades lineales (Silva *et al.*, 2015).

1.2.2.1. Unidades de masa (θ_m)

El contenido de humedad en unidades de masa (θ_m) corresponde a la relación entre la masa de agua (M_w) presente en la muestra húmeda y la masa de sólidos del suelo (M_s) después de haber sido secada a 105°C por 24 horas (Porta *et al.*, 2008).

$$\theta_m = M_w/M_s [MM^{-1}]$$

De acuerdo a la fórmula, los valores resultan en fracción de unidad. Para obtener el valor en porcentaje, es necesario multiplicar por 100:

$$\% \theta_m = (M_w/M_s) 100$$

El contenido de humedad en términos de masa puede ser mayor a 100% en los suelos altamente orgánicos o de origen volcánico, que retienen importantes cantidades de agua (Valarezo *et al.*, 1988).

1.2.2.2. Unidades de volumen (θ_v)

El contenido de humedad en unidades de volumen (θ_v) corresponde a la relación entre el volumen de agua (V_w) y el volumen total del suelo (V_t) (Datta *et al.*, 2017).

$$\theta_v = V_w/V_t [L^3L^{-3}]$$

De igual forma, en la ecuación anterior los valores resultan en fracción de unidad, para obtenerlos en porcentaje, es necesario multiplicar por 100.

$$\% \theta_v = (V_w/V_t) 100$$

Para transformar el contenido de humedad a términos de volumen a partir del contenido de humedad en unidades de masa, se requiere el valor de la densidad aparente del suelo (D_a), para lo cual es necesario aplicar la siguiente fórmula:

$$\% \theta_v = \% \theta_m \times D_a$$

El contenido de humedad en términos de volumen jamás puede ser mayor a 100%. No obstante, en los suelos arcillosos el volumen de agua a saturación puede exceder la porosidad total del suelo seco, debido a que estos suelos se hinchan, sobre-humedeciéndose (Valarezo, 2011).

1.2.2.3. Unidades lineales

La lámina (L) se define como el volumen de agua que contiene el suelo por unidad de área, hasta una profundidad específica; en otras palabras, es equivalente a la altura de la lámina de agua que se formaría si se extrajera toda el agua del suelo y se la estancara sobre la superficie (Lal y Shukla, 2004). Esta forma de expresar el contenido de agua se aplica especialmente en el cálculo del balance hídrico en el que se consideran las entradas y salidas de agua del suelo.

Para expresar el contenido de agua del suelo como lámina (mm) se multiplica el contenido de humedad del suelo en unidades volumétricas por la profundidad del suelo:

$$L_{\text{mm}} = \% \theta_v \times d \text{ [L]}$$

De donde:

d = profundidad (L_{mm})

1.2.3. Métodos para determinar el contenido de humedad del suelo

Se han desarrollado diversos métodos e instrumentos para determinar el contenido de humedad del suelo, los cuales se clasifican en métodos directos e indirectos. A excepción del método gravimétrico, el resto caen en la categoría de métodos indirectos, en los cuales las mediciones se realizan a través de variables que cambian en función del contenido de humedad (Bitelli, 2011).

Al respecto Verstraeten *et al.*, (2008) señalan que no existe un método único que sea adecuado en todas las circunstancias. Igualmente, Dorigo *et al.*, (2011) manifiestan que incluso cuando una técnica se emplea de manera consistente, las mediciones del contenido de humedad del suelo pueden verse fuertemente influenciadas por la calibración del instrumento, las condiciones de instalación, la resolución espacial, la cobertura geográfica; y, la representatividad de las mediciones obtenidas. Dobriyal *et al.*, (2012) y Martin (2017) complementan la afirmación haciendo referencia a factores tales como: las limitaciones físicas de las diferentes técnicas, el nivel de información requerida, el costo inicial del instrumento y el muestreo, la facilidad de uso del instrumento en el campo, tiempo de respuesta, gestión y durabilidad del equipo; y, las características físicas del suelo.

A continuación, se describen los principales métodos que permiten conocer el contenido de humedad del suelo: gravimétrico, sonda de neutrones, dieléctricos y empírico.

1.2.3.1. Método gravimétrico

Este método se usa ampliamente para determinar el contenido de humedad del suelo (Lagunas, 2013). Es el método más antiguo y directo que aún se emplea, y sigue siendo el estándar en base al cual se calibran los métodos indirectos (Zazueta y Xin, 1994).

El procedimiento consiste en secar en un horno una muestra de suelo a 105°C durante 24 horas. El contenido de agua en unidades de masa (g g^{-1}) se obtiene dividiendo la masa de agua para la masa de suelo seco. Para calcular el contenido de humedad en unidades volumétricas (m^3m^{-3}) se multiplica el contenido de agua en unidades de masa por la densidad aparente (Prichard, 2013).

El método gravimétrico proporciona mediciones precisas, no depende de la salinidad ni del tipo del suelo, es fácil de calcular y su equipo es de bajo costo (Petropoulos *et al.*, 2013). Sus mayores desventajas son: consume mucho tiempo, es destructivo, inaplicable al control automático, no se puede repetir el muestreo en el mismo lugar por lo que su cobertura espacial es limitada (Ansari y Deshmukh, 2017).

1.2.3.2. Método sonda de neutrones

Una sonda de neutrones contiene una fuente radioactiva de americio 241/berilio, que envía una cierta cantidad de neutrones rápidos (que son aproximadamente del tamaño de un átomo de hidrógeno, un componente esencial del agua) (Martin, 2017). Cuando los neutrones rápidos chocan contra los átomos de hidrógeno, se vuelven más lentos (ralentizados), formando una nube de neutrones termalizados (Petropoulos *et al.*, 2013). Prichard (2013) señala que el tamaño y la densidad de la nube dependen principalmente del tipo de suelo, el material del tubo de acceso y el contenido de agua del suelo.

Hignett y Evett (2002) afirman que el instrumento está equipado con una fuente de neutrones rápidos y un detector de neutrones lentos. El número de átomos de hidrógeno en los suelos cambia debido a la variación en el contenido de humedad del suelo; por lo tanto, el contenido de hidrógeno se puede calibrar

en comparación con el conteo de neutrones lentos. Muñoz-Carpena (2004) anota que el contenido de humedad volumétrica en el suelo se obtiene a partir de una calibración lineal entre la tasa de recuento de neutrones lentos leídos por la sonda en el campo y el contenido de humedad del suelo obtenido gravimétricamente de las muestras de campo.

Por otro lado, debido a que cada suelo tiene otras fuentes de hidrógeno que no están relacionadas con el agua (contenido de materia orgánica y minerales de arcilla), es necesario calibrar el equipo para cada tipo de suelo (Prichard, 2013). Para Evett (2008) una sonda de neutrones calibrada correctamente mediante muestreo gravimétrico es el método indirecto más preciso y confiable para la medición del contenido volumétrico de humedad del suelo. Dorigo *et al.*, (2011) señalan que la precisión de las medidas es de alrededor de 0.02 en el contenido de agua volumétrica.

Dobriyal *et al.*, (2012) anotan que la técnica no es destructiva, y que se pueden tomar medidas repetidas a cualquier profundidad. Kaur *et al.*, (2016) complementan las ventajas, al señalar que el tiempo de respuesta es rápido (1 a 2 minutos) y que puede ser automatizado para monitorear el contenido de humedad de manera espacial y temporal de un sitio determinado.

Las principales desventajas están relacionadas con el alto costo del equipo y el riesgo de radiación, por lo que se requiere mucho cuidado en el manejo y un operador debidamente capacitado con licencia (Kaur *et al.*, 2016). Además, se ha demostrado que son insensibles a la hora de medir la humedad del suelo cerca de la superficie (20 cm) debido a la discontinuidad del aire en el suelo (Zazueta y Xin, 1994).

1.2.3.3. Métodos dieléctricos

La medición dieléctrica aprovecha las diferencias en los valores de permitividad dieléctrica entre las diferentes fases del suelo (sólido, líquido y gas). La permitividad dieléctrica del agua es de 80 (dependiendo de la temperatura, la concentración de electrolitos y la frecuencia); en cambio, la permitividad dieléctrica del aire es 1 y de la fase sólida del suelo de 4 a 16, cuando se mide entre 30 MHz y 1 GHz (Wraith y Or, 1999). Este contraste hace que la permitividad dieléctrica del suelo sea muy sensible a la variación del contenido de humedad (Ansari y Deshmukh, 2017).

Aunque existen muchos dispositivos electrónicos y técnicas experimentales diferentes, todos los sensores dieléctricos aplican el principio del efecto de la permitividad dieléctrica del agua líquida sobre las propiedades dieléctricas del suelo (Robinson *et al.*, 2003).

Se han desarrollado dos aproximaciones de mayor uso para estimar el contenido volumétrico de agua del suelo en base a la constante di-eléctrica: la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) y la reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR).

1.2.3.3.1. Reflectometría en el dominio de tiempo (TDR)

El método TDR se ha expandido a nivel mundial y viene brindando una contribución relevante en los estudios de la relación suelo-agua-planta-atmósfera (Calamita *et al.*, 2012).

Este método permite cuantificar la humedad volumétrica del suelo en función de un dispositivo que propaga una onda electromagnética transversal de alta frecuencia a lo largo de un cable conectado a una sonda de conducción paralela que se ha insertado en el suelo (Ansari y Deshmukh, 2017). La señal se refleja de una sonda a otra antes de devolverse al medidor que mide el tiempo transcurrido entre el envío del pulso y la recepción de la onda reflejada (Petropoulos *et al.*, 2013). Prichard (2013) anota que, al conocer la longitud del cable y la longitud de la guía de onda, se puede calcular la velocidad de propagación. Cuanto más rápida sea la velocidad de propagación, menor será la constante dieléctrica, y consecuentemente disminuirá el contenido de humedad del suelo.

La determinación del contenido de humedad del suelo determinado con la TDR, ha ganado aceptación internacional debido a su capacidad para proporcionar rápidamente datos in situ (Gutiérrez - Gnechchi *et al.*, 2018). Dobriyal *et al.*, (2012) señalan que ésta técnica no es destructiva para el sitio de estudio, el instrumento es portátil, y se puede transportar fácilmente en el campo, consecuentemente no requiere mucha mano de obra. Ferrándiz (2017) complementa las ventajas al señalar que la técnica del TDR tiene una precisión superior al 1 o 2% del contenido volumétrico de agua, los requisitos de calibración son mínimos, no hay riesgo de radiación, tiene una excelente resolución espacial y temporal, las mediciones son fáciles de obtener, y es capaz de proporcionar mediciones continuas a través de la automatización.

Sin embargo, esta tecnología presenta ciertas desventajas. En suelos altamente salinos, con alto contenido de materia orgánica y de textura fina, varían las condiciones de la constante dieléctrica del suelo, por lo que es indispensable la calibración (Muñoz - Carpena, 2004; Lagunas, 2013).

1.2.3.3.2. Reflectometría de dominio de frecuencia (FDR)

La reflectometría de dominio de frecuencia (FDR) es similar al método de reflectometría de dominio de tiempo (TDR). La diferencia consiste en que la FDR proporciona la estimación del contenido de humedad del suelo sobre la base de la variación en la frecuencia de una señal debido a las propiedades dieléctricas del suelo (Dobriyal *et al.*, 2012).

La capacitancia eléctrica de un condensador que utiliza el suelo como dieléctrico, depende del contenido de humedad del suelo. Cuando el condensador está acoplado a un oscilador, formando un circuito eléctrico, los cambios en la frecuencia del circuito indican cambios en el contenido de humedad del suelo. La frecuencia del oscilador está restringida dentro de un cierto rango para determinar la frecuencia de resonancia. Esto da una medida del contenido de agua del suelo (Muñoz - Carpena *et al.*, 2012).

Esta técnica proporciona resultados precisos, pero requiere una calibración específica dependiendo del suelo en el que se aplique. La ambigüedad en la medición del tiempo de recorrido automático del instrumento, la sensibilidad a los poros llenos de aire, la esfera de influencia restringida, la salinidad del suelo, la temperatura, la densidad aparente y el contenido de arcilla limitan el uso de este método (Fenollar, 2017).

Entre sus principales ventajas se anotan: la posibilidad de obtener contenidos de humedad precisos y continuos a lo largo del perfil del suelo sin disturbar las propiedades del mismo, y una mejor resolución que el TDR (Dobriyal *et al.*, 2012). Además, no se ve afectado por los niveles de alta salinidad del suelo, el diseño de la sonda es flexible y robusto, es un método barato comparado con otros métodos; y, es muy sencillo conectar el sensor de humedad del suelo FDR con un micro controlador (Gutiérrez - Gnechi *et al.*, 2018).

Sus desventajas, se relacionan a que las medidas están referidas a un escaso volumen de suelo en torno a la sonda, lo cual requiere una cuidadosa instalación de la misma o del tubo de acceso en el campo. Además, estas sondas precisan

de una calibración previa en suelos arcillosos o con altos contenidos de materia orgánica (Kaur *et al.*, 2016). Es notable una mayor sensibilidad a la temperatura, densidad aparente, contenido de arcilla y espacios de aire que el TDR (Muñoz-Carpena, 2004).

1.2.3.4. Método visual y del tacto

Es el método más generalizado, sencillo y económico, pero el más subjetivo, ya que las diferentes apreciaciones obtenidas dependerán del criterio de las personas que examinen la muestra (Valarezo, 2011). Por lo general se utiliza cuando no se cuenta con equipos de mayor precisión o se requiere una determinación rápida de la humedad del suelo (Rivera *et al.*, 2004). Orrego (2007) señala que el método visual y del tacto es cualitativo y que no es exacto, pero con experiencia, se obtiene estimaciones con un 15 a 20 % de error.

Consiste en la determinación del comportamiento plástico de una muestra de suelo, la misma que se la aprisiona entre el pulgar y el índice o aprieta el suelo en la palma de la mano, de manera que, en función de la sensación de humedad que se perciba al tacto para los distintos tipos de textura, se puede determinar en forma aproximada el contenido de humedad (Martin, 2017). Es necesario el uso de una guía de campo a fin de establecer el comportamiento de la muestra de suelo en base a la textura y a la humedad aprovechable (Rosas, 2011).

Con la finalidad de ganar destreza en el campo, es conveniente que el tacto y la apariencia del suelo se contrasten con respecto al método gravimétrico (González, 2017).

1.3. Energía del agua en el suelo

1.3.1. Importancia y formas de la energía del agua en el suelo

El agua del suelo contiene energía en diferentes cantidades y formas. La física clásica reconoce dos formas principales de energía: cinética y potencial (Lanfranco *et al.*, 2014). Puesto que el movimiento del agua en el suelo es completamente lento ($< 0,1$ m/h) debido a la pequeña dimensión de los poros, su energía cinética ($v^2/2g$) se la considera insignificante (Hillel, 2004). Por otro lado, la energía potencial, la cual se relaciona con la posición y/o la condición interna, es de importancia primordial en los procesos del sistema suelo-agua-planta (Kirkham, 2014).

La principal característica física del suelo en relación con el crecimiento de las plantas es el estado energético en que se encuentra el agua contenida en él (Monteith y Unsworth, 2013). El conocimiento del estado energético relativo del agua en cada punto dentro del suelo permite evaluar las fuerzas que están actuando sobre el agua en todas las direcciones y establecer cuán lejos se encuentra para alcanzar el estado de equilibrio. En consecuencia, no es la cantidad absoluta de energía potencial contenida en el agua la que tiene importancia por sí misma; sino, más bien, el nivel relativo de aquella energía en diferentes regiones del suelo (Hillel, 2004).

La energía del agua del suelo es una medida de las fuerzas a las que está sometida, y tiene incidencia sobre: la disponibilidad de agua para las plantas, el movimiento del agua en el suelo; y las propiedades mecánicas del suelo (Rogers *et al.*, 2014).

El suelo retiene agua por medio de las fuerzas de cohesión y adhesión que resultan de la tensión superficial, la capilaridad y la presión osmótica (White, 2006). Se reconocen dos tipos de fuerzas que actúan sobre la humedad del suelo. Las fuerzas positivas que son aquellas que mejoran la afinidad de los suelos por el agua (cohesión y adhesión); en contraste, algunas fuerzas negativas que sacan el agua del suelo; incluyen, la gravedad, el crecimiento activo de las raíces y la demanda evaporativa de la atmósfera. En cualquier punto dado en el tiempo, el contenido de humedad en el suelo es el resultado neto de estas fuerzas positivas y negativas (Lal y Shukla, 2004).

1.3.2. Potencial del agua del suelo

La energía potencial representa la cantidad de trabajo que un cuerpo puede realizar en función de su energía almacenada; consecuentemente, la determinación del estado de la energía potencial del agua en el suelo permite estimar la cantidad de trabajo que una planta debe ejercer para extraer una unidad de agua (Kirkham, 2014). En tal virtud, el concepto de potencial del agua del suelo expresa la cantidad de trabajo necesario por unidad de masa, volumen o peso de agua pura que debe realizar para transferir irreversible e isotérmicamente una cantidad infinitesimal de agua, desde el estado de referencia estándar a la fase líquida del suelo en un punto considerado en el sistema suelo - planta - atmósfera (Hillel, 2004; Lanfranco *et al.*, 2014; Porta *et al.*, 2014).

El estado de referencia estándar que generalmente se usa, es aquel de un reservorio hipotético de agua pura (sin solutos), libre de fuerzas externas, excepto la gravedad, a presión atmosférica, a la misma temperatura que el agua del suelo y a una elevación dada y constante (Romano, 1999). Consecuentemente, desde el punto de vista termodinámico, la energía potencial puede ser considerada en términos de una diferencia de energía libre entre el agua del suelo y el agua del estado estándar (Monteith y Unsworth, 2013).

El potencial total del agua del suelo es medido en unidades de energía, la misma que puede expresarse en unidades de masa, volumen y peso (Dane y Hopmans, 2010):

energía por unidad de masa: $[L^2T^{-2}]$ ($J\ kg^{-1}$; $erg\ g^{-1}$)

energía por unidad de volumen: $[MT^{-2}L^{-1}]$ ($N\ m^{-2}$; $dyn\ cm^{-2}$)

energía por unidad de peso: $[L]$ (cm; m)

1.3.3. Componentes del potencial del agua del suelo

El agua del suelo está influenciada por diferentes campos de fuerza, los cuales determinan que su potencial sea diferente a aquel del agua pura y libre. Estos campos resultan de: la atracción de la fase sólida del suelo hacia el agua, la presencia de solutos, la acción de presiones causadas por las fases externas; y, la gravedad. De ello resulta que el potencial total del agua en el suelo es la suma de las contribuciones separadas (Porta *et al.*, 2014).

El agua del suelo está sometida a un potencial que tiene varios componentes, unos tienden a expulsarla (presión positiva), y otros procuran retenerla (presión negativa) (Bittelli, 2011).

El potencial total del agua del suelo (Ψ_T) está determinado por la suma algebraica de sus componentes (campos de fuerza que quitan energía al agua) (Smith y Warrick, 2007). Las diferencias en energía potencial entre un punto y otro determinan el flujo de agua dentro del suelo, por cuanto el agua se mueve constantemente en dirección decreciente de la energía potencial; esto es, desde los puntos de mayor potencial (zona húmeda) a aquellos de menor potencial (zona seca) (Easton y Bock, 2016).

De acuerdo con lo anterior, la fuerza que actúa sobre el agua del suelo desde una zona de mayor a menor potencial corresponde al gradiente de potencial

$(-d\psi/dx)$, el cual expresa el cambio de la energía potencial (ψ) en relación con la distancia (x). El signo negativo indica que la fuerza actúa en la dirección del potencial decreciente (Bitelli, 2010).

Los componentes del potencial total del agua del suelo son:

$$\Psi_T = \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_s$$

De donde:

Ψ_T = Potencial total del agua

Ψ_g = Potencial gravitacional

Ψ_p = Potencial de presión

Ψ_m = Potencial mátrico

Ψ_s = Potencial osmótico.

1.3.3.1. Potencial gravitacional (ψ_g)

Todo cuerpo sobre la superficie terrestre es atraído hacia el centro de la tierra por una fuerza gravitacional igual al peso del cuerpo; consecuentemente, el peso es el producto de la masa del cuerpo y la aceleración de la gravedad. Para levantar un cuerpo en contra de esta atracción es necesario realizar un trabajo, el mismo que se almacena en el cuerpo en forma de energía potencial gravitacional (Hillel, 2004).

La cantidad de “energía potencial gravitacional” depende de la posición del cuerpo en el campo de fuerza gravitacional; consecuentemente, el potencial gravitacional del agua del suelo en cada punto está determinado por la elevación (altura) del punto en relación con un nivel de referencia arbitrario (Lal y Shukla, 2004).

Si se toma la superficie del suelo como el nivel de referencia (lo que a menudo ocurre), el potencial gravitacional del agua del suelo (Ψ_g) es negativo para todos los puntos (Easton y Bock, 2016), y es independiente de las propiedades del suelo, de la presión del agua del suelo, y de las condiciones atmosféricas (ambientales) (Rogers *et al.*, 2014).

Desde la perspectiva expuesta, el potencial gravitacional (Ψ_g) es la energía requerida para mover una cantidad infinitesimal de agua pura y libre desde la elevación de referencia hasta la elevación del agua del suelo (White, 2006).

A una altura Z sobre el nivel de referencia, la energía potencial gravitacional E_g de una masa de agua M que ocupa un volumen V es:

$$E_g = MgZ = \rho_w VgZ$$

De donde:

$\rho_w =$ densidad del agua ($M L^{-3}$)

$g =$ aceleración de la gravedad ($L T^{-2}$)

El potencial gravitacional (ψ_g) se lo puede expresar de tres formas:

Por unidad de masa: $\psi_g = gZ$ ($erg g^{-1}$; $J kg^{-1}$)

Por unidad de volumen: $\psi_g = \rho_w gZ$ ($dyn cm^{-2}$; $N m^{-2}$)

Por unidad de peso: $\psi_g = Z$ (cm; m) (Lal y Shukla, 2004).

1.3.3.2. Potencial de presión (ψ_p)

Cuando el agua del suelo en un punto dado se encuentra a una presión hidrostática mayor a la atmosférica, el potencial se lo considera positivo (Ψ_p) y es la energía que tiene el agua debido a la presión de una columna de agua por encima de ese punto (Romano, 1999).

Así, todos los puntos bajo la superficie libre del agua tienen un potencial de presión positivo; en tanto que, el agua en aquella superficie se encuentra en un potencial de presión igual a cero (Sierra *et al.*, 2011). El potencial de presión solo ocurre en suelos saturados, por lo que es muy importante en el diseño de sistemas de drenaje (Valarezo, 2011).

El potencial de presión por debajo del nivel freático se lo denomina también como potencial de inmersión. La presión hidrostática (P) del agua en referencia a la presión atmosférica, es igual a $P = \rho_w gh$.

De donde, h es la carga piezométrica (profundidad de inmersión debajo de la superficie de agua libre); por lo tanto, la energía potencial de presión del agua del suelo (ψ_p) = PdV ; dV = volumen infinitesimal de agua (Easton y Bock, 2016).

El potencial de presión (ψ_p) se lo puede expresar de tres formas:

Por unidad de masa: $\psi_p = PdV/\rho_w dV = (gh)$ ($erg g^{-1}$; $J kg^{-1}$)

Por unidad de volumen: $\psi_p = PdV/dV = \rho_w gh$ ($dyn cm^{-2}$; $N m^{-2}$)

Por unidad de peso: $\psi_p = PdV/mg = PdV/\rho_w dV_g = h$ (cm; m) (Lal y Shukla, 2004).

1.3.3.3. Potencial matricial (ψ_m)

El potencial matricial (o mátrico) es el resultado tanto de las fuerzas capilares, generadas en la interfaces aire - agua, que se forman e interactúan dentro del geometría irregular de los poros del suelo como de las fuerzas de adsorción, producidas en la interfaces suelo - agua, se refiere, a la adhesión de las moléculas de agua a la superficie sólida debido a las fuerzas de corto alcance de Van der Waals y extensión de estos efectos por cohesión a través de enlaces de hidrógeno formados en el líquido (Kirkham, 2014; Rogers *et al.*, 2014). Ambas fuerzas atraen y retienen el agua en el suelo reduciendo su energía potencial por debajo del agua libre (Whalley *et al.*, 2013). Cuanto más seco está el suelo, más negativo (mayor en valor absoluto) es el potencial mátrico y mayor será la presión necesaria para extraer el agua (Porta *et al.*, 2014).

El potencial matricial es una propiedad dinámica, es negativo en suelos no saturados, mientras que por debajo del nivel freático su valor es cero (Tuller y Or, 2005). Consecuentemente, el potencial mátrico y el potencial de presión son mutuamente excluyentes (Bitelli, 2010).

El potencial matricial es más negativo en suelos de textura más fina que en suelos de textura gruesa, debido a la mayor área superficial y al menor diámetro de poros que tienen las partículas del primero; es por ello que los suelos arcillosos tienen un mayor contenido de agua no disponible para las plantas que los arenosos (Easton y Bock, 2016). De igual manera Whalley *et al.*, (2013) señalan que la presencia de agua en películas así como en meniscos cóncavos es más importante en suelos arcillosos y a altas succiones o bajo potencial, y está influenciada por la doble capa eléctrica y los cationes intercambiables presentes. En suelos arenosos, la adsorción es relativamente poco importante y predomina el efecto capilar.

La retención capilar de agua tiene lugar solamente a valores inferiores a $pF = 3.0$. Las fuerzas de retención por encima de este valor, son causadas casi exclusivamente por la adhesión del agua en la superficie de las partículas sólidas y por la retención osmótica en las dobles capas difusas (Villarroya, 2006).

En un sistema de suelo insaturado, la presión capilar se describe generalmente con la ecuación de Young-Laplace, de la manera siguiente: (Romano, 1999)

$$\Psi = 2Y \text{Cos}(\theta)/r$$

Donde:

Y = tensión superficial del agua.

θ = ángulo de contacto entre el agua y el suelo, en la interfaz aire-suelo-agua.

r = radio del poro.

Como el ángulo de contacto entre el agua y la superficie de la partícula del suelo, $\theta = 0$. Se tiene:

$$\Psi = 2Y/r$$

La presión capilar Y (en unidades de energía por unidad de volumen) es equivalente a la presión hidrostática en la base de una columna de agua de h metros de altura, la misma que responde a la siguiente ecuación:

$$\Psi = \rho wgh$$

Consecuentemente: $\rho wgh = 2Y/r$ (Whalley *et al.*, 2013)

Por otro lado, asumiendo un volumen infinitesimal de agua dV y una presión P , el potencial matricial ψ_m será: $P = PdV$

Por lo tanto, el potencial matricial (Ψ_m) se lo puede expresar en las siguientes unidades:

Por unidad de masa: $\psi_m = PdV/\rho w dV = gh = 2Y/\rho wr$ (erg g⁻¹; J kg⁻¹)

Por unidad de volumen: $\psi_m = \rho wgh = 2Y/r$ (dyn cm⁻²; N m⁻¹)

Por unidad de peso: $\psi_m = PdV/\rho w dVg = h = 2Y/\rho wgr$ (cm; m) (Lal y Shukla, 2004).

En base a los dos tipos de potenciales descritos, el potencial de presión (Ψ_p) y el potencial matricial (Ψ_m), se concluye lo siguiente:

Suelos saturados: $\Psi_m = 0$; $\Psi_p > 0$

Suelos húmedos (no saturados): $\Psi_m < 0$; $\Psi_p = 0$

1.3.3.4. Potencial osmótico (Ψ_o)

La presencia de solutos en el agua afecta sus propiedades termodinámicas (entropía, entalpía, energía libre) y disminuye su energía potencial, la cual corresponde al potencial osmótico (Ψ_o) (Hillel, 2004). Este fenómeno no influye significativamente sobre el flujo del agua en el suelo, pero tiene importancia cuando se presenta una membrana difusa (raíces) que trasmite el agua con mayor rapidez que las sales; consecuentemente, el potencial osmótico tiene más bien importancia en la interrelación suelo-raíces de la planta (Kirkham, 2014).

El valor del potencial osmótico es igual a cero para el agua pura, y negativo e inversamente proporcional a la concentración de sales disueltas, es decir, a mayor cantidad de sales el valor de Ψ_o aumenta negativamente, lo que significa que la presencia de iones en el agua reduce la energía de ésta (Porta *et al.*, 2014).

1.4. Curva característica de humedad del suelo

1.4.1. Principio e importancia

El trabajo que se requiere ejercer para extraer el agua del suelo será numéricamente igual, pero opuesto en signo, al potencial matricial del agua del suelo. Para cada contenido de humedad del suelo le corresponde un valor del potencial matricial (White, 2006). Cada suelo se caracteriza por tener una relación diferente entre el contenido de agua y el trabajo necesario para extraer un pequeño incremento de agua (Valarezo, 2011).

El potencial matricial se relaciona con el contenido de humedad por medio de una función denominada característica de humedad del suelo o función potencial matricial (factor intensidad: estado energético del agua del suelo) vs contenido de agua (factor capacidad: contenido de agua del suelo): $\Psi_m = f(\theta_v)$ (Dane y Hopmans, 2010).

La curva de retención de agua del suelo es el gráfico que representa la relación entre la humedad volumétrica (θ_v) y el potencial matricial (ψ_m), la cual constituye una herramienta fundamental para una serie de aplicaciones de la relación suelo-agua-aire (Datta *et al.*, 2017).

Debido a que la energía (trabajo) necesaria para extraer el agua del suelo aumenta exponencialmente, mientras que el contenido de humedad (θ_v) disminuye linealmente, para facilitar en la representación e interpretación de esta relación, en el gráfico se utiliza el logaritmo de la tensión de humedad del suelo expresado en unidades de centímetros de una columna de agua, que se conoce como pF (p = potencial y F = energía libre). Así, redondeando: 1 atm = 1 bar = 1 000 cm de columna de agua; pF = 3,0 (Romano, 1999).

La curva de retención de agua del suelo permite obtener la siguiente información (Kumar y Mitt, 2007):

- El volumen total de poros y la distribución de los poros por rangos de tamaño.
- La capacidad de aireación del suelo para las raíces y el espacio poroso drenable.
- La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, a partir de los cuales se calcula el volumen de agua aprovechable para las plantas.
- El espacio poroso físicamente inerte del suelo.
- La condición física del suelo para el crecimiento de las plantas (fertilidad física).

1.4.2. Factores que determinan la forma de la curva característica de humedad del suelo

La cantidad de agua retenida en el suelo a valores relativamente bajos de succión matricial (entre 0 y 1 bar), depende primeramente del efecto capilar y de la distribución del tamaño de poros, por lo que es fuertemente afectada por la estructura del suelo (Hillel, 2004).

Consecuentemente, el cambio en la estructura y la distribución del tamaño de poros conduce a cambios en la curva característica de humedad del suelo (Lal y Shukla, 2004). La curva característica de humedad de un suelo bien estructurado tiene un fuerte punto de inflexión como indicativo de un cambio en la distribución del tamaño de los poros, lo que no sucede con un suelo sin una estructura definida (Silva *et al.*, 2015).

Por otro lado, la retención de agua en el rango más alto de succión, en forma creciente se debe a la adsorción, siendo, por consiguiente, menos afectada por la estructura, pero más por la textura; en otras palabras, por la superficie específica del material del suelo (Chavarria y Pessoa dos Santos, 2012).

A mayor contenido de arcilla, mayor será el contenido de agua retenida a cualquier succión particular y más gradual será la pendiente de la curva; en tanto que, en un suelo arenoso, la mayoría de los poros son relativamente grandes, por lo que, una vez que éstos han sido vaciados a una cierta succión, solamente quedará retenida una pequeña cantidad de agua (Smith y Warrick, 2007).

También, el contenido de materia orgánica tiene influencia sobre la forma de la curva y la retención de agua del suelo. El aumento del contenido de materia orgánica del suelo, se refleja en el incremento de la capacidad total de retención de agua (Ghisolfi, 2011). De igual forma, la materia orgánica desempeña un papel importante, especialmente a bajas succiones, por lo que la humedad del suelo a capacidad de campo (pF 2,5) aumenta linealmente con un aumento en el contenido de materia orgánica (Lal y Shukla, 2004).

1.4.3. Puntos importantes de la curva característica de humedad del suelo

1.4.3.1. Saturación

La saturación es la condición del suelo en la que todos los poros se llenan con agua. El contenido de humedad en este umbral varía de 30% en suelos arenosos a 60% en los arcillosos. El potencial matricial en el estado de saturación depende menos de la textura del suelo y es cercano a cero, lo que indica que existe una restricción mínima para el movimiento del agua, y que las raíces de las plantas pueden extraer agua del suelo con la mínima energía (Datta *et al.*, 2017).

Sin embargo, el suelo rara vez alcanza la saturación total, ya que pueden formarse burbujas de aire y permanecer ocluidas dentro de la matriz, incluso cuando el suelo está con exceso de agua. Además, las burbujas de aire pueden efervescerse en el suelo debido a la acción microbiana o cuando la temperatura aumenta y se supera la solubilidad de los gases (Hillel, 2004).

El punto de intersección de la curva de retención de agua del suelo con el eje de las abscisas corresponde a una tensión de 1 cm ($pF = 0$). En este punto, el volumen representa el contenido de agua del suelo en la condición de saturación, que como ya se mencionó, equivale a la porosidad total (Porta *et al.*, 2008).

1.4.3.2. Capacidad de campo (CC)

La capacidad del campo es la cantidad de agua contenida en el suelo después de que el exceso de agua ha sido drenado por gravedad y la velocidad de movimiento hacia abajo es relativamente estable, lo que generalmente ocurre entre 1 y 3 días después de un riego o lluvia abundante (Valipour, 2014). Se trata en cierta medida del contenido máximo de agua que puede retener el suelo cuando la mayoría de la macroporosidad está ocupada por aire (Lanfranco *et al.*, 2014).

El término de capacidad de campo ha causado conclusiones engañosas; ya que, si se produce drenaje, éste se incluye en el uso consuntivo por las plantas, conduciendo a estimar valores del mismo que son demasiado grandes (Chavarría y Pessoa dos Santos, 2012). Los suelos arcillosos raramente alcanzan un contenido de humedad a capacidad de campo, ya que siguen drenando durante un largo período de tiempo. También, los suelos con impedimento de drenaje nunca alcanzan la capacidad de campo (Jordán, 2010).

En virtud de lo anterior, por no representar un valor exacto de contenido de agua, al concepto de capacidad de campo se lo asume como el límite superior del agua aprovechable para las plantas, el mismo que varía de 20% en suelos arenosos a 40% en suelos arcillosos (Datta *et al.*, 2017). Además, es necesario precisarlo con el contenido de agua que el suelo retiene a un determinado valor de succión. Así, la CC para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA) corresponde al contenido de agua que el suelo retiene a una succión de $1/3$ de atm ($pF = 2,52$). En cambio, para la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (SICS), corresponde al contenido de agua que el suelo retiene cuando ha sido sometido a una succión de $1/10$ de atm ($pF = 2,0$) (Valarezo *et al.*, 1998).

Los principales factores que afectan al contenido de humedad de un suelo a capacidad de campo, son: la textura (especialmente el contenido de arcilla), los tipos de minerales arcillosos, la porosidad, la distribución del tamaño de poros;

y, el contenido de materia orgánica. Así, los suelos de textura arcillosa tienen un mayor contenido de humedad a CC. Por su parte, los suelos minerales con arcillas 2:1 presentan un mayor contenido de humedad a CC que los suelos con arcillas del tipo 1:1. De igual manera, los suelos con alto contenido de materia orgánica tienen un valor más alto de CC (Lal y Shukla, 2004).

1.4.3.3. Punto de marchitez permanente (PMP)

El punto de marchitez permanente se considera como el límite inferior de la humedad disponible en el suelo para las plantas. Se lo define como el contenido de agua por debajo del cual las plantas mesofíticas no son capaces de extraer agua del suelo (Lanfranco *et al.*, 2014). También, el punto de marchitez permanente varía ampliamente entre los diferentes tipos de textura de los suelos, desde 7% en suelos arenosos a 24% en suelos arcillosos (Datta *et al.*, 2017).

A diferencia de la CC, el PMP no es significativamente influenciado por la agregación, la porosidad estructural y el contenido de materia orgánica del suelo; más bien, está principalmente gobernado por la cantidad y naturaleza de la arcilla. Así, el PMP es mayor en suelos con un alto contenido de arcilla, y es más alto en arcillas del tipo 2:1 que en aquellas 1:1 (Lal y Shukla, 2004).

El PMP se estima como el contenido de agua que retiene una muestra de suelo equilibrada con una presión de -1 500 KPa (-15 bar de succión equivalente a pF = 4,2), en un equipo de placas de presión. El volumen de agua al PMP representa el volumen inservible de poros del suelo (Monteith y Unsworth, 2013).

1.4.3.4. Agua aprovechable (AA)

El volumen de agua retenida en el suelo entre la capacidad de campo (pF = 2,0 ó 2,52) y el punto de marchitez permanente (pF = 4,2) corresponde al agua aprovechable: $AA (\% \theta_v) = CC (\% \theta_v) - PMP (\% \theta_v)$, la misma que constituye la solución del suelo y es la principal fuente de agua para el desarrollo de las plantas (Valarezo, 2011; Valipour, 2014).

El agua aprovechable, es una característica importante que determina las cualidades físicas de los suelos. Así, los suelos con alto contenido de agua aprovechable tienen mayor potencial para producir biomasa vegetal, que aquellos con baja agua aprovechable (Kirkham, 2014).

En contraste al efecto del contenido de arcilla sobre la capacidad de campo, es difícil generalizar el mismo sobre el agua aprovechable; por cuanto, al incrementarse el contenido de arcilla aumenta tanto la CC como el PMP. En cambio, el efecto de la materia orgánica en el agua aprovechable es bien definido, dado que al aumentar el contenido de materia orgánica se incrementa la capacidad de campo, pero no el punto de marchitez permanente, y por lo tanto, aumenta el agua aprovechable (Lal y Shukla, 2004).

1.4.3.5. Capacidad de aireación (CA)

El volumen que resulta de la diferencia entre el contenido de agua a saturación ($pF = 0$) y el contenido de agua a capacidad de campo ($pF = 2,0$ ó $2,52$), corresponde a la capacidad de aireación del suelo: $CA (\% \theta_v) = \text{Satur. } (\% \theta_v) - CC (\% \theta_v)$ (Bitelli, 2010). En otras palabras, los poros del suelo que están ocupados por aire a capacidad de campo conforman la porosidad de aireación, por lo que es un parámetro muy importante para la difusión del oxígeno hacia las raíces y para los cálculos de drenaje (Romano, 1999).

En general, si la porosidad de aireación se encuentra entre 10 - 15% del volumen del suelo, es satisfactoria para el desarrollo de las raíces de las plantas. Desde el punto de vista del drenaje, esta porosidad corresponde al espacio poroso drenable, también llamada porosidad efectiva, y representa a los poros del suelo que tienen un diámetro equivalente mayor a 30 micras (Chavarria y Pessoa dos Santos, 2012).

1.4.4. Determinación de la curva característica de humedad del Suelo

Debido a la variación exponencial de los valores de succión, se han desarrollado varios métodos y equipos para determinar la curva de retención de agua del suelo en rangos definidos del potencial matricial.

A continuación, se describen los principales métodos que permiten determinar el potencial matricial del suelo (Ψ_m): tensiómetro, bloques de yeso, sensores de matriz granular, y cámara de presión.

1.4.4.1. Método del tensiómetro

Los tensiómetros se los denominan raíces mecánicas, ya que proporcionan una indicación de lo difícil que es para la planta obtener agua del suelo (Prichard, 2013). El tensiómetro mide la energía potencial negativa (potencial matricial)

con que el agua es retenida por el suelo en un punto determinado (Valarezo, 2011). Este instrumento consiste de un tubo de plástico lleno de agua y herméticamente cerrado; en la parte superior, equipado con un manómetro de vacío (vacuómetro) graduado en centibares (cb), y una cámara de reserva; y, en el extremo inferior, una cápsula porosa de cerámica (Enciso *et al.*, 2005).

Según se va secando el suelo, éste pierde humedad y absorbe agua del tensiómetro a través de la cápsula de cerámica, lo cual genera una tensión negativa (potencial matricial) en el sistema, la misma que sigue aumentando gradualmente a medida que el suelo continúa perdiendo humedad (Kaur *et al.*, 2016). Cuando el suelo se humedece nuevamente (por lluvia o por riego), la tensión negativa disminuye al fluir el agua del suelo al tensiómetro a través de la cápsula porosa. En ambos casos, el valor de la tensión negativa se registra en el manómetro (Petropoulos *et al.*, 2013).

Una lectura de cerca de 0 cb, indica condiciones de suelo saturado. Cuando las lecturas oscilan de 6 a 10 cb, revelan que el suelo está cerca de la capacidad de campo para suelos de textura gruesa; mientras que, las lecturas de 25 a 30 cb corresponden a la capacidad del campo en suelos de textura fina. Las lecturas de 75 cb, en los suelos de textura gruesa indican que el agua disponible ha sido agotada en casi 100%, pero solo el 35% en los suelos de textura fina (Prichard, 2013).

Entre las ventajas del tensiómetro, se destaca que es un método sencillo, económico, preciso, no destructivo, y relativamente fácil de instalar y mantener (Lagunas, 2013). Si se instalan tensiómetros a varias profundidades se puede conocer el movimiento del agua a través de los horizontes del suelo (Ferrándiz, 2017).

Los tensiómetros no dan lecturas directas del contenido de agua del suelo. El contenido de agua del suelo, se obtiene a partir de la curva característica de humedad del suelo (contenido volumétrico de humedad vs potencial matricial del suelo) (Dobriyal *et al.*, 2012).

Su mayor desventaja se relaciona con que a pesar que los tensiómetros tienen un manómetro graduado de 0 a 100 cb, el rango práctico de operación es de 0 - 80 cb. Más allá de esta tensión, el aire entra a través de la cápsula de cerámica y pierde sensibilidad el instrumento (Enciso *et al.*, 2005). Además, Muñoz - Carpena (2004) señala que es indispensable que exista un contacto íntimo entre

la capsula de cerámica porosa y el suelo a fin de obtener lecturas consistentes y evitar recargas frecuentes (rotura de la columna de agua en el interior).

Los tensiómetros son frágiles y requieren cuidado durante su instalación y mantenimiento en el campo (Lagunas, 2013). Ansari y Deshmukh (2017) señalan que después de los ciclos de secado/humectación extremos, es necesario volver a llenar de agua el tanque de reserva del tensiómetro, así como eliminar el aire atrapado con una bomba de vacío manual.

1.4.4.2. Bloques de yeso

Un bloque de yeso se compone de una celda electroquímica con una solución saturada de sulfato de calcio (CaSO_4) como electrolito, que es colocado en la zona de raíces (Muñoz - Carpena *et al.*, 2012). Este método determina el potencial de agua en función de la resistencia eléctrica, medido con un voltaje de corriente alterna que se establece entre dos electrodos, porque la corriente continua produce efectos de polarización (Fenollar, 2017). Lagunas (2013) señala que dado que los cambios en la conductividad eléctrica del suelo afectarían las lecturas, el yeso se utiliza como amortiguador contra los cambios en la salinidad del suelo (hasta una cierta concentración).

El uso de bloques de yeso es sencillo, fácil de instalar, económico, precisa de un mantenimiento mínimo y no se requiere calibración (Dobriyal *et al.*, 2012).

Entre sus desventajas, Muñoz - Carpena (2004) señalan: las propiedades de los bloques cambian con el tiempo debido a la deposición de arcilla y la disolución del yeso (especialmente en suelos salinos) perdiendo su calibración; tiempo de reacción muy lento, no tiene una buena respuesta en suelos arenosos (el agua se drena más rápidamente de lo que el instrumento puede equilibrar); no apto para suelos expansivos. Kaur *et al.*, (2016) complementan al anotar que se deben calibrar; el tiempo de respuesta es muy inferior; no mide la humedad cuando el suelo está saturado; y, corta vida útil (1 a 3 años).

1.4.4.3. Sensores de matriz granular

Durante la década de los 90 del siglo anterior surgió un nuevo sensor, basado en el mismo principio que los bloques de yeso, denominado sensor de matriz granular, que consiste de electrodos incrustados en un material de cuarzo

granular, rodeado por una membrana sintética y una malla protectora de acero inoxidable (Muñoz - Carpena *et al.*, 2012).

Estos sensores miden la resistencia eléctrica a la corriente que fluye entre dos electrodos inmersos en un material como la arena fina rodeada por un material poroso sintético (Santa Olalla *et al.*, 2005). Las lecturas de resistencia eléctrica entre los dos electrodos son convertidas en potencial de agua en el suelo, a través de una ecuación de calibración que trae internamente el equipo (Kaur *et al.*, 2016). Aunque la resistencia eléctrica se mide en ohms, el medidor portátil convierte automáticamente la lectura a centibares. La resistencia eléctrica aumenta a medida que se incrementa la succión del agua en el suelo, esto es, a medida que disminuye la humedad del suelo (Enciso *et al.*, 2005).

Los resultados deben ser interpretados cuidadosamente de acuerdo a las características del suelo. Por ejemplo, una lectura de 10 cb puede corresponder a la capacidad de campo en suelos de textura gruesa (arena); mientras que 30 cb puede referirse a la capacidad de campo en suelos de textura más fina (limosos, arcillosos). Las lecturas altas en el medidor, indican que el suelo se está secando. Por lo tanto, una lectura de 75 cb puede corresponder a un déficit de 90 % para suelos de textura gruesa, pero solamente de 30% para suelos de textura fina (Lagunas, 2013).

Enciso *et al.*, (2005) señalan que sus principales ventajas son: se reducen los problemas inherentes a los bloques de yeso (por ejemplo, la pérdida de contacto con el suelo debido a la disolución y la distribución inconsistente del tamaño de los poros); y, es un método sencillo, económico y de mínimo mantenimiento. Muñoz - Carpena (2004) anotan igualmente que este tipo de sensores permite mediciones de humedad del suelo cerca de la saturación; y, que el rango de medición oscila de 10 a 200 cb.

Dobriyal *et al.*, (2012) destacan que las desventajas más importantes son: baja resolución; tiempo de reacción lento; no funciona bien en suelos arenosos donde el agua se drena más rápidamente de lo que el instrumento se puede equilibrar; no es adecuado para suelos expansivos.

1.4.4.4. Método de la cámara de presión

El equipo de cámaras de presión es el instrumento más preciso de los que se dispone para mediciones del potencial matricial del suelo en laboratorio

(Orellana, 2010). Este método permite determinar los puntos de la curva característica de humedad del suelo en el rango de 0 a 15 atmósferas de presión, siendo posible ensayar varias muestras simultáneamente, con la consiguiente reducción de tiempo (Fenollar, 2017). Se compone de cámaras que, cerradas herméticamente, reciben presión de aire desde un compresor. Las muestras de suelo húmedo contenidas en cilindros se ubican en una placa de cerámica porosa, cuya cara inferior está cubierta por un delgado diafragma de neopreno (Cartes y Vargas, 2007).

Durante el proceso, a cualquier presión seleccionada en la cámara de extracción, el agua del suelo fluirá alrededor de las partículas y luego atravesará la placa de cerámica porosa, para ser expulsada hacia fuera mediante un tubo de drenaje. El equilibrio se alcanza cuando cesa el flujo de agua en el tubo de drenaje, momento en el cual hay una correspondencia exacta entre la presión de aire en la cámara y el potencial matricial en la muestra de suelo. Se abre la cámara y se registra el peso de la muestra de suelo más el cilindro. Seguidamente, se somete la misma muestra a una presión mayor dentro de la cámara. Al final del rango de trabajo se determina gravimétricamente el contenido de agua de la muestra (Bitelli, 2010).

Para la determinación de la curva característica de humedad del suelo en el rango de 0 a 4 atmósferas, se utiliza una cámara de presión con placas de cerámica porosa en el mismo rango de presión; y otra cámara para el rango de hasta 15 atmósferas (Fenollar, 2017). Para el rango de presión menor, es necesario disponer de muestras de suelo inalteradas; mientras que para las muestras de alta presión, se utilizan muestras de suelo alteradas (Valarezo, 2011).

1.4.5. Condiciones físicas del suelo para el crecimiento de las plantas

La distribución de los volúmenes de las tres fases del suelo (sólida, líquida y gaseosa) a capacidad de campo ($pF = 2,0$ ó $2,52$), sirve para evaluar el estado físico del suelo para el crecimiento de las plantas. Para ello se requiere disponer de los volúmenes porcentuales de: 1.- capacidad de aireación (poros de diámetro equivalente mayor a 30 micras); 2.- agua aprovechable (poros de diámetro de 0,2 a 30 micras); y, 3.- volumen físicamente inerte del suelo (volumen de poros inservibles $< 0,2$ micras). Estos valores se los ubica en un diagrama triangular, en el que se han delimitado cinco zonas de las condiciones físicas del suelo: I (muy pobre); II (pobre); III (medio); IV (bueno); V (muy bueno) (Ilaco, 1981).

1.5. Infiltración del agua en el suelo

1.5.1. Características del proceso y su importancia

La infiltración es el proceso que define la entrada y el movimiento vertical del agua a través de la superficie del suelo en una unidad de tiempo definida (LT^{-1}) (Porta *et al.*, 2014). Es una propiedad hidrodinámica estrechamente relacionada con los procesos de capilaridad y las fuerzas asociadas con la adhesión y la cohesión de las partículas del suelo (Forero, 2000; citado por Varón, 2016).

La velocidad con que el agua se infiltra en un suelo no es uniforme, la tasa de infiltración disminuye con el tiempo hasta alcanzar un valor constante (Laly Shukla, 2004), debido a que el gradiente matricial de succión inicial es elevado en las capas superficiales, en particular cuando el suelo está seco (Porta *et al.*, 2008). También, la velocidad de infiltración disminuye rápidamente como resultado del deterioro gradual de la estructura del suelo y el consiguiente sellado parcial del perfil por la formación de una corteza superficial densa y por la hinchazón de la arcilla o el aire atrapado (Tiwari y Raghuwanshi, 2014).

La infiltración es un parámetro que cuantifica la velocidad de descenso del agua en las primeras capas del suelo. Puesto que la penetración del agua en el suelo es causada por fuerzas matriciales y gravitacionales, la entrada puede ocurrir no sólo en dirección descendente, sino también en dirección lateral y ascendente (Tarjuelo, 2005). Las fuerzas matriciales predominan sobre la fuerza gravitacional en las primeras etapas de la entrada de agua en el suelo, de modo que muchas de las conclusiones a que se llega relativas a las primeras etapas de la infiltración son válidas en ausencia de la gravedad (Kirkham, 2014).

La infiltración es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico; y, en los ecosistemas terrestres dependientes del agua, un verdadero detonante de relaciones ecológicas imprescindibles para su funcionamiento (Martínez de Azagra *et al.*, 2006). Al respecto, Landini *et al.*, (2007) señalan que la infiltración, como un componente del ciclo hidrológico, está relacionada con el escurrimiento superficial (que puede producir erosión) y con la recarga de los acuíferos y su vulnerabilidad a la contaminación; por lo tanto, su evaluación es de suma importancia para un manejo sustentable de las tierras en procura de evitar su degradación.

En toda actividad de aprovechamiento del agua y manejo del suelo, es esencial conocer a qué velocidad el agua de lluvia o de riego se infiltra, por lo que la infiltración es uno de los parámetros básicos más importantes para el diseño e implementación de sistemas de riego, con miras a un uso y manejo racional del suelo y el agua; así como, en la predicción de la vulnerabilidad a la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas (Lal y Shukla, 2004; Landini *et al.*, 2007).

Durante el riego, la infiltración puede implicar los siguientes procesos: un movimiento de agua unidimensional (vertical), tal como ocurre en el riego por aspersión o por inundación; un movimiento de agua bidimensional, como ocurre en el riego por surcos; y, un movimiento de agua tridimensional, como ocurre en el riego por goteo (Tarjuelo, 2005).

En la ingeniería de riego, la infiltración del agua en el suelo y su movimiento en la zona no saturada, es de fundamental importancia para el control de la recarga al perfil del suelo del agua perdida por evapotranspiración; así como, para el lavado de suelos salinos y alcalinos sometidos al proceso de recuperación (Angella *et al.*, 2016).

La planificación y ejecución de proyectos de riego y drenaje, siempre están precedidos por investigaciones hidropedológicas, las mismas que sirven, por un lado, para formarse una visión clara de las condiciones hidráulicas predominantes en el área de riego; y, por otro, para obtener los criterios necesarios sobre los parámetros básicos de diseño, tanto del sistema de riego como de drenaje (Hillel, 2004).

La velocidad de infiltración es considerada como un indicador clave de la calidad física del suelo; así, una tasa de infiltración muy lenta o demasiado rápida crea problemas en el manejo del agua y del suelo (Arshad y Martin, 2002).

El agua que no se infiltra causa una serie de inconvenientes en la superficie del suelo:

- en los terrenos planos se estanca; en cambio, en aquellos inclinados fluye como escorrentía, la cual es responsable de la erosión hídrica (a mayor escorrentía, mayor erosión);

- no es utilizada por los cultivos para la transpiración (excepto en el caso del arroz); y,
- no ayuda a lavar el exceso de sales en la zona radicular.

Lafranco *et al.*, (2014) mencionan que se reconocen las siguientes subdivisiones del proceso de infiltración:

- Infiltración instantánea (I_{ins}): es el volumen de agua que se filtra a través de una superficie de suelo horizontal unitario en un período de tiempo infinitamente pequeño.
- Infiltración acumulada (I_{cum}): es el volumen total de agua que se ha infiltrado a través de una unidad de área horizontal de la superficie del suelo, durante un período determinado de tiempo (inicio y final de la prueba).
- Infiltración media (I_{av}): equivale al valor de la infiltración acumulada dividido por el tiempo desde el inicio y el final de la prueba de infiltración.
- Infiltración básica (I_b): es la infiltración que presenta una tasa relativamente constante, la misma que se alcanza después de 3 o 4 horas de iniciada la prueba. El término relativamente constante significa que el cambio de la velocidad de infiltración es $<10\%$ a la velocidad de infiltración de la hora precedente; así: $(I_t - I_{t+1}) < 0,1 I_t$ (t expresado en horas).

1.5.2. Factores que influyen en la velocidad de infiltración

La tasa de infiltración de un suelo depende de las siguientes características: textura, estructura, contenido de humedad inicial del suelo, la condición de la superficie (suelo desnudo, con presencia de costra, o vegetación), cantidad de materia orgánica, temperatura del suelo, calidad de agua aplicada, y la distribución del diámetro de poros (Landini *et al.*, 2007). A más de los factores señalados se anotan: grado de compactación, contenido de sodio intercambiable, pendiente del terreno, presencia de grietas en suelos con arcillas expansibles (Lafranco *et al.*, 2014); y, el manejo del suelo (gestión de la tierra) (Bamutaze *et al.*, 2009).

La infiltración en un suelo arcilloso es afectada por la estructura del mismo; así, la presencia de grietas o de vías de paso de la fauna del suelo (bioporos) puede acelerar significativamente la tasa de infiltración. Cuando estos poros no existen, la infiltración es muy lenta. Algunos suelos arcillosos cuando se secan se contraen y pueden desarrollar grietas, pero en el período húmedo se hinchan y las aberturas se cierran completamente, reduciéndose casi a cero la infiltración (Haghnazari *et al.*, 2015).

Bamutaze *et al.*, (2009) han determinado que hay un incremento de la tasa de infiltración con el aumento de la pendiente del terreno, dado que a medida que la inclinación se hace más pronunciada, más partículas finas son transportadas por el flujo superficial (erosión laminar), reduciendo así la probabilidad de obstrucción de los poros por sellado de la capa superficial del suelo. Asmamaw y Mohammed (2012), igualmente consideran que los suelos localizados en sitios con pendiente pronunciada tienen alta infiltración, ya que su textura es más arenosa, dado que las partículas finas se depositan en el fondo de las cañadas.

Morgan *et al.*, (1997) señalan que la vegetación demuestra ser un parámetro muy importante que incrementa la capacidad de infiltración de los suelos, influenciando el tiempo y duración de la escorrentía. Coello *et al.*, (2007) anotan que los suelos degradados del Austro Ecuatoriano que se encuentran desprovistos de vegetación, han perdido completamente su estructura, por lo que la infiltración es más baja en el suelo descubierto de vegetación que en aquellos con árboles y arbustos. Al respecto, Valarezo (2011) manifiesta que la vegetación superficial ejerce un efecto positivo sobre la estabilidad de la estructura del suelo, dado que la combinación de la vegetación aérea con la penetración de las raíces en el horizonte superficial estimula la tasa de penetración del agua; en consecuencia, la tasa de infiltración en un suelo desnudo o con poca vegetación, es menor que la de un suelo cubierto de vegetación.

La infiltración se incrementa paralelamente al aumento del tamaño de los poros. En este sentido, Hillel (2004) señala que la tasa de infiltración está condicionada por la distribución de los poros de distinto tamaño, y la continuidad de los poros o fisuras. En un suelo arenoso el volumen de poros grandes es mayor, siendo más rápida la tasa de infiltración; mientras que, en un suelo arenoso fino que tiene poros más pequeños, ésta es más lenta. Al respecto, Silva *et al.*,

(2015) indican que el tamaño, la forma y la continuidad de los poros son, en gran medida, los factores categóricos del movimiento del aire y el agua en el suelo. Las características de los poros están determinadas por la estructura de los agregados, y ésta también interviene en el grado de interconexión de los poros del suelo, lo cual influye en la infiltración y la permeabilidad.

La introducción de ganado en las praderas presenta el riesgo potencial de compactación del suelo debido al sobre pisoteo de los animales, con la consiguiente disminución de la infiltración y la menor aireación, como se ha observado en suelos con escasa materia orgánica, especialmente aquellos de textura arcillosa y arena arcillosa (Ferrero, 1991).

Por otro lado, los altos niveles de sodio intercambiable provocan la dispersión y expansión de las partículas del suelo, debido a que el sodio desplaza a los cationes calcio y magnesio de los sitios de intercambio, los cuales forman parte de los complejos estructurales que generan una materia granular apropiada para los cultivos, provocando con ello la obstrucción de los poros y la consecuente disminución de la infiltración del agua en el suelo (Barreto *et al.*, 2003).

1.5.3. Procedimientos para estimar la velocidad de infiltración

Se han desarrollado numerosos modelos para estimar la infiltración, los cuales se dividen en tres grupos: 1.- teóricos o con base física; 2.-semi-empíricos; y, 3.- empíricos (Mishra *et al.*, 2009, citados por Guevara y Márquez, 2012).

Los modelos con base física son de complejidad variable y se fundamentan en la ley de conservación de la masa y la ley de Darcy, dependiendo de las consideraciones de dimensionalidad, dinámica de flujos, conductividad hidráulica - carga capilar (o contenido de agua), relación de retención; y, condiciones límites e iniciales. En este grupo de modelos están: Green y Ampt (1911); Philip (1957 y 1969); Mein y Larson (1971 y 1973); Smith (1972); y, Smith y Parlange (1978).

Los modelos semi-empíricos utilizan formas sencillas de la ecuación de continuidad (con frecuencia espacialmente concentrados) y la hipótesis elemental de la relación de la capacidad de infiltración - infiltración acumulada (o la relación flujo - concentración). En este grupo están los modelos de Horton (1938); Holtan (1961); Overton (1964); Singh y Yu (1990); y, Grigorjev e Iritz (1991).

Los modelos empíricos se basan en mediciones de campo o pruebas experimentales de laboratorio ajustadas a un modelo sencillo. A este grupo le corresponde los modelos de Kostiaikov (1932); Soil Conservation Service (1956 y 1971); Huggins y Monke (1966); Smith (1972); y, Collis-George (1977).

Debido al comportamiento diferente de las pruebas de infiltración en el campo y en el laboratorio, no siempre es evidente cuál de los modelos de estimación de los parámetros de la infiltración es el mejor y bajo qué condiciones (Guevara y Márquez, 2012).

1.5.4. Interpretación de los valores de la infiltración básica

En la Tabla 1. para diferentes rangos de valores de la infiltración básica, Ferrero (1991) anota las siguientes categorías:

Tabla 1. Categorías de la infiltración básica

Infiltración básica (cm h ⁻¹)	Interpretación
< 0,127	Muy lenta
0,127 – 0,50	Lenta
0,50 – 2,00	Moderadamente lenta
2,00 – 6,35	Media
6,35 – 12,7	Moderadamente rápida
12,7 – 25,0	Rápida
>25,0	Muy rápida

1.6. Flujo de agua en suelo saturado

El flujo de agua en el suelo saturado influye en los procesos de: redistribución del agua, aireación, disponibilidad de nutrientes para las plantas, y temperatura del suelo; por lo tanto, su conocimiento es esencial para la gestión integral de los recursos hídricos (Prieto *et al.*, 2006).

1.6.1. Conductividad hidráulica saturada (Ks)

1.6.1.1. Principio e importancia

La conductividad hidráulica saturada (Ks) de un medio poroso como el suelo, se refiere a su capacidad para conducir agua cuando el suelo se encuentra en estado de saturación. Describe la funcionalidad de su sistema poroso,

englobando propiedades tales como: cantidad, tamaño, morfología, continuidad y; orientación de los poros (Porta *et al.*, 2014). Es el volumen de agua que fluye a través de una sección transversal del suelo por unidad de tiempo, cuando se somete a un gradiente hidráulico (Mohsenipour y Shahid, 2016; USDA, 2017).

La K_s es una de los más importantes parámetros de las interacciones suelo-agua-planta, la cual está fuertemente influenciada por la estructura, la conectividad de los poros, y las propiedades del fluido (viscosidad y temperatura). La K_s de un suelo describe los procesos de infiltración y redistribución de agua en el perfil y es un reflejo del arreglo estructural de un suelo (Deb y Shukla, 2012).

Es una propiedad física que es utilizada con diversos fines, tanto dentro como fuera del ámbito agrícola (riego, drenaje, recarga y conservación del suelo) (Sandoval *et al.*, 2012). Weynants *et al.*, (2009) destacan que tiene un impacto significativo en los problemas geotécnicos (muros de contención, taludes, terraplenes, cimentaciones, etc.), y en las relaciones hidrológicas del suelo. En los diseños de drenaje, los valores de K_s son indispensables para definir la distancia a la que deben ir ubicados los drenes (Pfeiffer, 2008).

Debido a que la K_s depende en gran medida de la forma y continuidad del sistema poroso, varía fuertemente de un sitio a otro, y difiere también para las distintas orientaciones del suelo y el tiempo (Ellies *et al.*, 1997). A mayor tamaño de poros, mayor es la conductividad, por lo cual, es una propiedad que depende fuertemente de la estructura, la textura y la composición mineralógica de las arcillas. Se puede decir que los suelos porosos y/o bien estructurados son los que reportan los valores más altos de conductividad hidráulica (Aguilar, 2014).

García-Sinovas *et al.*, (2010) indican que debido a que la K_s es altamente variable en el tiempo y en el espacio, la obtención de un valor representativo puede requerir grandes muestreos para la caracterización espacial de un determinado escenario. De igual forma Jarvis *et al.*, (2013) manifiestan que existe una variación estacional en los valores de K_s debido al cambio en la cobertura vegetal y la intensidad de las precipitaciones. Oosterbaan y Nijland (1994) señalan que la variabilidad estacional ocurre principalmente en suelos arcillosos con propiedades de expansión y contracción al humedecerse y secarse, respectivamente (arcillas tipo 2/1: montmorillonita o esmectita).

La ley de Darcy es la ecuación fundamental que describe el movimiento de agua en el suelo; relaciona la proporción de flujo con la resistencia de la matriz del suelo y las fuerzas que actúan en cada unidad de agua del suelo (Kirkham, 2014). El flujo saturado ocurre cuando la presión del agua de los poros es positiva; es decir, cuando el potencial matricial del agua de suelo es cero. En la mayoría de suelos esta situación tiene lugar cuando aproximadamente el 95% del espacio poroso total está lleno con agua, el restante 5% está con aire atrapado (Donado, 2004).

Los métodos de medición de la K_s se basan en la aplicación directa de la ley de Darcy, la misma que señala que el caudal Q (volumen de agua que fluye a través de una columna de suelo saturado por unidad de tiempo), es directamente proporcional al coeficiente de proporcionalidad K_s (conductividad hidráulica), a la sección transversal uniforme (A) y al gradiente hidráulico ($\Delta H/L$) (Hillel, 2004).

$$Q = K_s A \Delta H/L$$

De donde:

Q = Caudal [L^3T^{-1}]

K_s = Coeficiente de proporcionalidad de la conductividad hidráulica saturada [LT^{-1}]

A = Área [L^2]

$\Delta H/L$ = Gradiente hidráulico (adimensional)

Los valores de la conductividad hidráulica saturada (K_s) presentan una distribución de tipo log-normal, atribuida a los diferentes tamaños de poros del medio; así, los suelos de textura gruesa mostrarán rangos de K_s más elevados que aquellos de textura fina (Stibinger, 2014).

Para analizar el flujo hídrico, el medio poroso de un suelo se puede dividir en dos dominios: los micro-poros, que se comportan como un medio homogéneo; y, los macro-poros, a través de los cuales el fluido es conducido a mayor velocidad que en el dominio anterior (Mohsenipour y Shahid, 2016).

Durante la pérdida de contenido hídrico de un suelo a partir de su estado de saturación, su conductividad decrece rápidamente, siendo los poros de mayor tamaño los que se vacían primero. Se produce una rápida disminución de la

conductividad hidráulica a medida que el volumen de poros que participa es menor, haciéndose la circulación hídrica en el suelo más complicada (flujo no saturado) (USDA, 2017).

1.6.1.2. Factores que afectan la conductividad hidráulica

La K_s está directamente relacionada a la porosidad efectiva (distribución del tamaño de poros y la tortuosidad, que en resumen se denomina geometría de los poros del suelo); por lo tanto, está determinada por la estructura del suelo (Hillel, 2004). Los factores que influyen en la estructura del suelo se pueden diferenciar en propiedades estáticas inherentes al suelo, tales como: mineralogía de arcilla, distribución y tamaño de las partículas ;y, propiedades dinámicas tales como: contenido de carbono orgánico o actividad biótica, estos últimos son grandemente influenciado por el uso y la cobertura del suelo (Sarki *et al.*, 2014).

Valores elevados del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en el suelo generan una dispersión y expansión de las partículas de arcilla, obstruyendo los espacios porosos, de lo que resultan valores muy bajos de la K_s (Barreto *et al.*, 2003).

Otros factores que inciden en la K_s son: la estabilidad de los agregados del suelo, el clima, la labranza, el uso de la tierra, la dinámica de las raíces ;y, la actividad de los organismos del suelo (Mohsenipour y Shahid, 2016). También, la pendiente del terreno (Rawl *et al.*, 1988, citados por Sarki *et al.*, 2014).

La textura y estructura afectan la K_s . La textura es relativamente fácil de medir y es poco variable en el tiempo y el espacio; mientras que, la estructura es lo opuesto. Además, el aire atrapado por efecto de un rápido humedecimiento del suelo puede disminuir el movimiento del agua reduciendo la K_s (Gabriels *et al.*, 2011).

Adicionalmente, la K_s varía espacialmente (horizontal y vertical), debido a: los microorganismos (su multiplicación y la consiguiente descomposición de la materia orgánica pueden obstruir los poros); las grietas y cavidades (resultante de la actividad de las lombrices y descomposición de las raíces); y, la heterogeneidad del medio poroso (variaciones en las características físicas de distintos estratos) (Salgado, 2010).

1.6.1.3. Métodos para determinar la conductividad hidráulica

Al ser la K_s el parámetro hidráulico más importante para el flujo y los fenómenos relacionados con el transporte del agua en el suelo, su predicción requiere de una medición cuidadosa (Gabriels *et al.*, 2011); sin embargo, existe una preocupación que surge de la idoneidad, la eficiencia y la facilidad de los diferentes métodos de medición en diferentes condiciones (Ibrahim y Aliyu, 2016).

Se han desarrollado varios métodos para medir la K_s tanto de laboratorio como de campo; no obstante, hay que considerar que éstos presentan problemas con la variabilidad espacial, la exactitud de los procedimientos y la escala de medición (Hillel, 2004), por lo que la selección de un método es siempre un desafío para los ingenieros (Mohsenipour y Shahid, 2016). La preocupación surge de la idoneidad, la eficiencia y la facilidad de los diferentes métodos de medición en diferentes condiciones, siendo los métodos de campo y laboratorio muy difíciles, laboriosos y costosos (Ibrahim y Aliyu, 2016). Las causas pueden ser, por un lado, la técnica empleada (procedimiento para la obtención de la muestra, extrema sensibilidad al volumen del suelo, dimensión, geometría de flujo, etc.); y, por otro, las particularidades del suelo (estructura, textura, etc.) (Lee *et al.*, 1985).

La diferencia principal entre los métodos de laboratorio y de campo radica en que en el laboratorio la muestra se satura completamente; en cambio, en el campo, esto no es posible y sólo se logra su saturación en una pequeña región adyacente a la fuente de infiltración. Además, en el campo, el agua infiltrada va desplazando y atrapando aire entre los poros del suelo, provocando una resistencia adicional al flujo; mientras que, en el laboratorio, la muestra se satura de abajo hacia arriba eliminando el aire atrapado (Gupta *et al.*, 1993 citado por Luna *et al.*, 2005).

La selección del método más apropiado dependerá del objetivo que se persigue, de la precisión requerida en los resultados, de los materiales y equipo disponible, y del tipo de suelo donde se realizarán las pruebas (Aguilar, 2014).

Debido a la variabilidad de los resultados, la dificultad de realización de las pruebas y la incertidumbre que implican las suposiciones de los modelos elegidos, en algunos casos es conveniente estimar la conductividad hidráulica

de los suelos a partir de otros parámetros cuya obtención sea más sencilla (correlación) (Donado, 2004).

Los métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada se dividen en tres grupos: métodos de laboratorio; métodos de correlación; y, métodos de campo (Mohsenipour y Shahid, 2016).

1.6.1.3.1. Métodos de laboratorio

En el laboratorio la determinación de la K_s se realiza en muestras inalteradas tomadas en cilindros de 100 cm³, debidamente saturadas, mediante el uso de un permeámetro, ya sea de carga constante o de carga variable (Oosterbaan y Nijland, 1994). Son métodos rápidos, prácticos y de bajo costo; sin embargo, la falta de homogeneidad de la muestra de suelo (orificios producidos por gusanos, piedras, etc.), la probable alteración de la estructura al momento de la toma de muestra, y lo pequeña de la misma, es posible esperar gran variabilidad y escasa representatividad (Salgado, 2010).

De acuerdo a las necesidades, las muestras se pueden tomar a diferentes profundidades. Se recomienda obtener un gran número de ellas para conseguir un valor K_s representativo.

1.6.1.3.1.a. Método de permeámetro de carga constante

El método de permeámetro de carga constante se adapta regularmente para suelos granulares. El procedimiento permite que el agua se mueva a través del suelo, bajo una condición de carga en estado estable, mientras que la cantidad (volumen) de agua que fluye a través de la muestra del suelo se mide durante un período de tiempo determinado (Lal y Shukla, 2004).

1.6.1.3.1.b. Método de permeámetro de carga variable

Este método es adecuado especialmente para suelos con baja conductividad hidráulica. Cuando la carga hidráulica cambia gradualmente, el nivel del agua en cualquier momento es la diferencia con el nivel del agua en el momento anterior. La carga de gravedad hace que el nivel de agua en el instrumento baje (Mohanty *et al.*, 1994).

1.6.1.3.2. Métodos de correlación

Los métodos de correlación obtienen el valor de K_s a partir de propiedades del suelo más fácilmente disponibles, tales como: textura, densidad aparente, etc. Estos enfoques de estimación se conocen ampliamente como funciones de pedotransferencia (Deb y Shukla, 2012).

La ventaja de un método de correlación, es que la estimación es más simple y rápida que la determinación directa. Una desventaja es que la relación seleccionada sea poco precisa, lo que conduciría a grandes errores (Oosterbaan y Nijland, 1994).

La estimación de la K_s por los métodos de correlación requiere una gran experiencia y precaución, y es aplicable solo para suelos arenosos y limosos ligeros con buena permeabilidad. Además, es necesario indicar que el valor obtenido de la conductividad hidráulica saturada (K_s) no es un valor exacto, sino que proporciona estimaciones de orden de magnitud (Stibinger, 2014).

1.6.1.3.3. Métodos de campo (in-situ)

Los métodos de campo (in situ) se dividen en métodos a pequeña escala y a gran escala. Los métodos a pequeña escala están diseñados para pruebas rápidas en muchos sitios. Ellos imponen condiciones de flujo simples, para evitar la complejidad, de modo que las mediciones puedan realizarse de manera relativamente rápida y económica (Salgado, 2010).

Los métodos de campos a gran escala garantizan valores K_s representativos, donde el problema de la variación se elimina tanto como sea posible, por lo que son más fiables; sin embargo, son más caros y requieren más tiempo (Stibinger, 2014).

1.6.1.3.3.a. Métodos de campo (in-situ) a pequeña escala

Estos métodos se dividen en dos grupos: debajo del nivel freático y sobre el nivel freático (Mohsenipour y Shahid, 2016).

Métodos bajo el nivel freático

Debajo del nivel freático el suelo está saturado por definición; entonces basta con eliminar el agua del suelo creando un sumidero, y observar la tasa de flujo

ascendente del agua en el mismo junto con la carga hidráulica inducida. Estos métodos se denominan “métodos de extracción”. El valor K_s se puede calcular con una ecuación seleccionada para ajustarse a las condiciones del entorno (Mohanty *et al.*, 1994). Los métodos más relevantes son los siguientes:

Método del pozo barrenado

El método del pozo barrenado es utilizado ampliamente en grandes investigaciones en el mundo, dado que es rápido, fácil, confiable, requiere únicamente un equipo simple de reducido costo, y los cálculos son muy sencillos (Mohsenipour y Shahid, 2016).

El procedimiento consiste en realizar un hoyo con un barreno a una profundidad determinada por debajo del nivel freático (profundidad que puede variar dependiendo del tipo de sondeo y de la homogeneidad del suelo). Cuando el agua en el pozo alcanza el nivel con el agua freática, se extrae el agua del pozo de manera que el agua freática vuelva a fluir a través de las paredes y del fondo del mismo. Con la ayuda de un flotador y una cinta previamente instalados, se mide la velocidad de ascenso del agua en la perforación a determinados intervalos de tiempo (Oosterbaan y Nijland, 1994).

A fin de obtener un valor promedio confiable, se recomienda registrar alrededor de cinco lecturas a intervalos fijos de 30 segundos, debiéndose terminar la prueba cuando se ha recuperado el 25% del volumen de agua extraído, para evitar la formación de un embudo (Stibinger, 2014).

Método del piezómetro

El principio de este método se asemeja al del pozo barrenado, ya que igualmente se realiza una perforación con un barreno a la profundidad deseada bajo el nivel freático (Salgado, 2010). La diferencia radica en que, en el pozo se inserta un tubo de P.V.C de 5 cm de diámetro y que, en la parte inferior del mismo, en una longitud de 15 cm se realizan varios orificios alrededor. Una vez que el nivel de agua en el tubo ha alcanzado el equilibrio con el agua subterránea, se extrae el agua del tubo por medio de una bomba. Debido a la diferencia de presión, el agua fluirá desde el suelo circundante hacia el pozo, lo que hará que aumente el nivel del agua en el tubo. Finalmente, se realiza la medición del cambio de lectura en el piezómetro a determinados intervalos de tiempo (Macías *et al.*, 2018).

Métodos sobre el nivel freático

Sobre el nivel freático el suelo no está saturado, por lo tanto, se debe aplicar suficiente agua para obtener condiciones de saturación. Estos métodos se llaman “métodos de infiltración”, ya que para determinar el valor K_s usan la relación entre la tasa de infiltración medida y la carga hidráulica. La ecuación que describe la relación debe seleccionarse de acuerdo con las condiciones inducidas del entorno (Mohanty *et al.*, 1994).

Método del infiltrómetro de doble anillo

Es un método muy utilizado debido a su fácil aplicación, por medio del cual se determina la tasa de infiltración vertical del agua en el suelo por unidad de área y de tiempo, que luego de 3 a 4 horas alcanza una velocidad de descenso constante (equivalente a que la diferencia de la velocidad de descenso de la lámina de agua sea menor al 10% de la hora precedente), la cual es equivalente a K_s (Hillel, 2004).

La prueba consiste en insertar un par de cilindros concéntricos (infiltrómetros) en el suelo a una profundidad de 10 cm, procurando que queden bien nivelados y con la menor afectación al suelo. Seguidamente, en ambos cilindros se agrega agua hasta un determinado nivel (10 cm), y a través de una regla se mide el descenso del nivel de agua en el cilindro interior a diferentes intervalos de tiempo. La función del cilindro exterior, es la de amortiguador, ya que evita que el agua ingrese lateralmente desde el cilindro interior, por lo cual se debe mantener el mismo nivel de agua en los dos compartimentos (Stibinger, 2014).

Método del orificio inverso (Porchet)

El método del orificio del barreno inverso, también conocido como método Porchet, consiste en realizar un hoyo de 8 a 10 cm de diámetro con un barreno tipo Edelman a la profundidad deseada; a continuación, se agrega agua para saturar el hoyo por alrededor de 48 horas hasta alcanzar una condición estable. Luego, se mide con la ayuda del sistema cinta - flotador, el descenso del nivel de agua a determinados intervalos de tiempo, y se aplica una fórmula específica para calcular la K_s . Profundizando gradualmente el hoyo con el barreno y llenándolo con agua, se puede medir en el mismo hoyo la conductividad hidráulica de las capas sucesivas del suelo (Valarezo, 2011; Macías *et al.*, 2018).

Método del permeámetro de Guelph

El método del permeámetro de Guelph, es fácil, rápido, con menos consumo de agua, y permite realizar la prueba en menor tiempo en comparación con otros métodos. El permeámetro utiliza el principio de Mariotte, construido con dos tubos concéntricos que actúan como depósito de agua, manteniendo la carga hidráulica constante en un hoyo realizado en el suelo (Mohsenipour y Shahid, 2016). Se hacen mediciones de la velocidad de flujo que se infiltra en estado estacionario, a partir de las cuales se calcula la K_s . La sorptividad y el potencial de flujo mátrico del suelo también pueden medirse con este método (Stibinger, 2014).

1.6.1.3.3.b. Métodos de campo (in-situ) a gran escala

Los métodos in situ a gran escala se pueden dividir en métodos que usan el bombeo de pozos y el flujo desde los drenes.

El primer método se puede aplicar para capas de suelo profundas y gruesas, con un alto valor de conductividad hidráulica (acuíferos). Su principal limitación es que es un método laborioso y se aplica solo en suelos gruesos, homogéneos y permeables (Stibinger, 2014).

El método del flujo desde los drenes se puede realizar en campos experimentales, áreas piloto o en drenajes existentes. Consiste en realizar observaciones en las descargas de los drenes en relación con las elevaciones correspondientes del nivel freático en el suelo a cierta distancia de los drenajes. A partir de estos datos, los valores de K_s se pueden calcular con una fórmula de drenaje adecuada para las condiciones en las que funcionan los drenajes (Oosterbaan y Nijland, 1994).

1.6.1.4. Interpretación de los valores de la conductividad hidráulica del suelo

Según Hillel (2004) los rangos de los valores de K_s en el suelo se pueden interpretar de acuerdo a las categorías que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Categorías de la conductividad hidráulica saturada

Ks (m d⁻¹)	Interpretación
< 0,03	Muy lenta
0,03 – 0,12	Lenta
0,12 – 0,50	Moderadamente lenta
0,50 – 1,50	Moderada
1,50 – 3,00	Moderadamente rápida
3,00 – 6,00	Rápida
> 6,0	Muy rápida

1.7. Compactación del suelo

1.7.1. Terminología y proceso de compactación

Para facilitar la comprensión del proceso de compactación es necesario diferenciar entre los siguientes términos: compresión, compactación, consolidación, y adensamiento. Compresión es la disminución del volumen del suelo causado por la aplicación de una fuerza externa (Coder, 2000). Compactación es la compresión de suelos no saturados, durante este proceso hay expulsión de aire del suelo (Lall y Shukla, 2004). Consolidación se refiere a la compresión de los suelos saturados durante la cual hay expulsión de agua de los poros, este parámetro tiene más aplicación en el campo de la ingeniería civil (estabilidad y seguridad de las estructuras) que en la agricultura (Douglas *et al.*, 1999; Hillel, 2004). Adensamiento es el re-empaquetamiento de los micro agregados y de las partículas del suelo lo que causa la pérdida de la estructura como consecuencia del uso excesivo de implementos agrícolas en las labores de preparación del suelo (Amézquita y Chávez, 1999). Los componentes del término genérico “compactación del suelo” no necesariamente ocurren en el orden señalado o en todo tipo de suelo (Coder, 2000).

La susceptibilidad del suelo a la compactación depende de factores externos e internos. Los externos se relacionan con el tipo, intensidad, frecuencia y tiempo de aplicación de una carga; los internos, con la distribución granulométrica, tipo de arcilla, contenido de materia orgánica, densidad aparente, agregación, contenido de humedad y propiedades mecánicas (Horn *et al.*, 1995).

Las partículas minerales del suelo son incompresibles, por lo que el cambio en el volumen del suelo durante la compactación se da en base al volumen

de poros, orificios y grietas. Las fuerzas que causan la compactación deslizan, ruedan y empaquetan las partículas del suelo, de lo que resulta un volumen más pequeño (Keller *et al.*, 2012).

La compactación del suelo producto de una fuerza externa, ocurre cuando se sobrepasa su capacidad de soporte (Hillel, 2004). Horn *et al.*, (1995) señalan que los suelos son sistemas trifásicos que experimentan cambios tan pronto como las tensiones externas superan su resistencia interna, definida por el valor de la tensión de pre-compresión.

La compactación afecta en diferente grado las propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos del suelo (Hakansson, 2005). Desde el punto de vista agronómico, la compactación es una forma física de degradación del suelo, que destruye la estructura, afecta la cantidad y tamaño de los macroporos, restringe el movimiento del agua y del aire, limita la emergencia de los cultivos, aumenta la densidad aparente y la resistencia a la penetración de las raíces (Warren y Taylor, 2010; Nawaz *et al.*, 2012). Ello se traduce en un menor desarrollo del sistema radical de las plantas; y, por lo tanto, en una menor producción (Taboada, 2007). El suelo compactado restringe el crecimiento de las raíces y la penetración en el subsuelo, generando con ello plantas atrofiadas y estresadas, con limitado consumo de agua y nutrientes, lo que se traduce en una reducción del rendimiento de los cultivos (Baker, 2014). La disminución puede alcanzar hasta 50% (Wolkowski y Lowery, 2008).

El proceso de aireación del suelo es uno de los determinantes más importantes en su productividad, debido a que las reacciones biológicas de importancia agronómica que ocurren a nivel edáfico (actividad microbiana y radical) consumen O₂ y producen CO₂, tipificando de este modo un sistema aeróbico (Horn *et al.*, 1995).

A medida que los poros grandes (macroporos) colapsan por efecto de la compactación, se forman poros más pequeños que son menos eficientes, dando como resultado menores tasas de infiltración y conductividad hidráulica saturada, así como, suelos mal aireados (Stiegler, 2012). Además, se generan condiciones aneróbicas; y, consecuentemente, reducción de la nitrificación, pérdida de nutrientes en la zona radicular y cambios en el metabolismo de las plantas (Ramírez y Salazar, 2010). Se requiere que el suelo tenga un rango de macroporos de 10 a 15 %, para permitir, tanto una adecuada respiración de las

raíces, como el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono entre el suelo y la atmósfera (Dexter, 1988).

La compactación puede originar o acelerar otros procesos de degradación del suelo; por cuanto, al reducir la tasa de infiltración, se incrementa la escorrentía en los terrenos con pendiente, lo que consecuentemente genera, por un lado, graves procesos de erosión y de deslizamientos en masa (Abu - Hamdeh, 2003), y por otro, peligro de contaminación del agua (Giménez *et al.*, 2010). En cambio, en las partes planas, la compactación puede dar lugar a la anegación de los terrenos, con la consiguiente destrucción de los agregados y la formación de costras, generando con ello la falta de oxígeno, alteraciones en la composición química de los nutrientes, ya sea propios del suelo, o aportados como fertilizantes (Forsythe *et al.*, 2006).

Por ejemplo, si un poro se reduce diez veces de tamaño, la cantidad de agua que puede fluir a través del mismo en un tiempo dado será diez mil veces menor en comparación con el diámetro inicial del poro. Esto constituye un efecto ambiental perjudicial de la compactación sobre la tasa de percolación y recarga de los acuíferos, eventualmente subyacentes, y sobre el desarrollo de los cultivos y de la producción agropecuaria en general (Douglas *et al.*, 1999).

La estructura del suelo es importante porque determina la capacidad del mismo para retener y conducir el agua, los nutrientes y el aire necesarios para la actividad de las raíces de las plantas (Baker, 2014). Los suelos con estructura bien desarrollada y elevada estabilidad de los agregados, ofrecen mayor resistencia a la compresión que otros sin esas características (NRCS, 2001). Por efecto de la compactación los agregados del suelo se destruyen y las partículas se reorientan en una estructura plana (con fisuras principalmente horizontales), o se amasan en una masa de alta resistencia (Giménez *et al.*, 2010), lo que influye negativamente en todas las fases de la producción del cultivo, incluida la germinación de las semillas, la emergencia de las plántulas, el crecimiento de las raíces, y la absorción de nutrientes y agua (Warren y Taylor, 2010).

Una acumulación de CO₂ debido a la difusión restringida en el suelo compactado reducirá la respiración de la raíz. En condiciones anaeróbicas, el rendimiento de energía de la respiración puede reducirse hasta en 94%. La reducción de la energía metabólica restringirá la función de la raíz y su supervivencia (McKenzie, 2010). Las propiedades físicas modificadas del suelo debido a la compactación pueden alterar la movilidad de los elementos

y cambiar los ciclos de nitrógeno y carbono a favor de más emisiones de gases de efecto invernadero en condiciones húmedas (N_2O , CH_4 y CO_2) (Nawaz *et al.*, 2012). La compactación del suelo disminuye su biodiversidad al disminuir la biomasa microbiana, la actividad enzimática, la fauna y la flora (Hillel, 2004).

La compactación del suelo es de carácter multifactorial ya que intervienen una serie de variables, tales como: textura, humedad del suelo, y materia orgánica, las cuales se abordan a continuación:

Textura vs compactación

La susceptibilidad de los suelos a la compactación varía con la textura (Warren y Taylor, 2010). Las partículas de tamaño similar son menos susceptibles de compactarse que una mezcla de diferentes tamaños, por cuanto las partículas más pequeñas pueden rellenar los espacios entre las más grandes (Wolkowski y Lowery, 2008).

La compactación es más alta en los suelos de textura fina que en aquellos de textura gruesa (Chakraborty y Mistri, 2017); así, los suelos arcillosos y limosos son más susceptibles a la compactación porque sus partículas retienen más agua durante más tiempo que las arenas, dando como resultado que los suelos arcillosos permanezcan en estado plástico, lo que significa que se comprimirán y cizallarán cuando se les aplique una carga (Warren y Taylor, 2010). Por el contrario, los suelos arenosos ofrecen más resistencia a ser compactados (Borrelli y Oliva, 2005). Un suelo muy arenoso apenas consigue almacenar agua; en tanto que, un suelo en el que abundan las arcillas de tipo montmorillonita, tiene un punto de marchitamiento tan elevado que para la mayoría de las plantas resulta difícil conseguir agua, por no hablar de otros problemas asociados al alto contenido de arcilla, como el encharcamiento o las grietas de desecación (Pulido, 2014).

En los suelos de textura franco arenosa, arenosa y pedregosos con alto contenido de materia orgánica, normalmente la compactación del suelo es menos severa, más lenta o simplemente no se presenta (Welke y Fyles, 2005); en cambio, los suelos arenosos, por el tamaño relativamente grande de sus partículas, son difíciles de comprimir, por lo que generalmente tienen poca o ninguna estructura, y las partículas se asientan en posición con muy poca fuerza mecánica aplicada (Chakraborty y Mistri, 2017).

Humedad vs compactación

El contenido de humedad del suelo está relacionado directamente con la compactación (Welke y Fyles, 2005; Wolkowski y Lowery, 2008; Warren y Taylor, 2010). Así, los suelos arcillosos, cuando están húmedos, son altamente compactables debido a que las arcillas tienen agua asociada a su alrededor, que actúa como lubricante, facilitando que las partículas se muevan unas sobre otras. En estas condiciones de humedad, incluso los suelos de textura gruesa pueden ser compactados (Wolkowski y Lowery, 2008). En condiciones secas, los suelos arcillosos que cuentan con agregados estables, pueden resistir relativamente bien la compactación (Warren y Taylor, 2010).

Los suelos secos son difíciles de compactar debido a que las partículas se atraen electrostáticamente, lo que genera fricción entre ellas impidiendo que se muevan (Kok *et al.*, 1996). De igual manera, Hillel (2004) señala que un suelo seco resiste la compactación debido a su rígida matriz y al alto grado de resistencia de sus partículas a la deformación por fricción. También, Nawaz *et al.*, (2012) anotan, que a baja humedad, las partículas están fuertemente unidas y crean más resistencia a la penetración; pero, a medida que aumenta el contenido de humedad, las fuerzas electrostáticas se van perdiendo y disminuye la resistencia a la penetración.

Al aumentar la humedad del suelo las películas de agua debilitan los enlaces entre las partículas y se reduce la fricción interna, lo que propicia condiciones más apropiadas para la compactación (Kok *et al.*, 1996). Consecuentemente, todo suelo tiene un *contenido de humedad óptimo* que permite compactarlo al máximo con el menor esfuerzo, alcanzando paralelamente su permeabilidad más baja (Barreto y Gámez, 2017). El suelo se puede compactar más fácilmente, alcanzando el grado máximo cuando el contenido de humedad está alrededor de la capacidad de campo (Pumphrey *et al.*, 1980; Stiegler, 2012). Para evitar la compactación del suelo durante las labores agrícolas, es deseable que la humedad esté en el rango de 0,8 a 0,95 del límite plástico (LP) (Keller, 2004; Pérez, 2012).

Cuando la humedad del suelo se acerca a la saturación, el suelo ya no puede densificarse en la misma medida que con humedad a capacidad de campo por el mismo esfuerzo de compactación (Towhid, 2013); entonces, se ha alcanzado el punto en el que disminuye el potencial de compactación (Arriaga *et al.*, 2018).

Consecuentemente, los suelos saturados resisten la compactación debido a que los poros están llenos de agua, la cual no es compresible (Wolkowski y Lowery, 2008; Warren y Taylor, 2010; Arriaga *et al.*, 2018).

Al respecto, Horn y Lebert (1994) citados por Achim *et al.*, (2000) reportan que en los suelos saturados la transmisión de las presiones producidas con una carga es más isotrópica, debido a la presencia de presiones neutras; es decir, el agua libre del suelo soporta parte de la carga. En estos casos la distribución espacial de las tensiones es homogénea, semejante a las presiones hidrostáticas; pero, una vez desplazada el agua debido a un gradiente hídrico, la distribución de las tensiones es anisotrópica, porque la propagación de las tensiones se efectúa por los puntos de contacto entre los sólidos.

Materia orgánica vs compactación

La materia orgánica del suelo promueve la formación de agregados estables, la infiltración y retención de agua, el intercambio gaseoso y el control de la erosión (Warren y Taylor, 2010); consecuentemente, el contenido de materia orgánica es una variable importante en el fenómeno de compactación (Alameda, 2010).

La compactación del suelo se incrementa a medida que disminuye el contenido de materia orgánica (Hamza y Anderson, 2005); por lo que, los suelos con bajo contenido de materia orgánica, que no forman agregados gruesos, estables y fuertes, tienden a ser más susceptibles a la compactación (Wolkowski y Lowery, 2008; Stiegler, 2012). En cambio, los suelos con mayores niveles de materia orgánica, en general, tienen una mejor estructura y resisten mejor la compactación (Ago y Kessler, 1996).

La materia orgánica es un buen acondicionador de las propiedades físicas del suelo, ya que a medida que aumenta su contenido, se incrementa la porosidad y disminuye la resistencia a la penetración (Warren y Taylor, 2010). Las capas superficiales del suelo son más ricas en materia orgánica que las más profundas. Al aumentar la profundidad de cultivo con el laboreo, se reduce temporalmente la materia orgánica del suelo (Stiegler, 2012).

Es indudable que la materia orgánica del suelo incrementa la resistencia mecánica al actuar como enlace entre las partículas, aumentando los valores del ángulo de fricción (Stiegler, 2012). Cuando las aplicaciones de materia orgánica son muy frecuentes y/o se sobrepasa el nivel permitido (dependiente de las

características propias del suelo), se puede generar inestabilidad mecánica y una menor capacidad de soporte, de lo que resultan nuevos procesos de compactación en el mediano plazo (Cuevas *et al.*, 2006).

1.7.2. Evaluación de la compactación

En virtud de la incidencia que la compactación tiene sobre el desarrollo de las plantas, su evaluación es fundamental para el manejo del suelo en la perspectiva de alcanzar una elevada y sostenida producción agropecuaria (Hettiaratchi *et al.*, 2007).

Los métodos que se emplean con mayor frecuencia para cuantificar la compactación del suelo son: la resistencia a la penetración y la densidad aparente (Nawaz *et al.*, 2012).

1.7.2.1. Resistencia a la penetración

El grado de compactación del suelo se puede cuantificar midiendo la resistencia a la penetración (Mărunțelu y Rus, 2017), la cual es la capacidad del suelo en su estado confinado para resistir la penetración de un objeto rígido (Lall y Shulka, 2004). Es un atributo tanto cualitativo como cuantitativo, que se manifiesta por la capacidad o fuerza intrínseca de un suelo para resistir la penetración, la deformación o el desplazamiento, al someterlo a una fuerza mecánica externa (Lomeling y Mori, 2015).

En la práctica, se mide la resistencia que presenta el suelo a la penetración de una punta cónica con especificaciones estandarizadas (Montanari *et al.*, 2012). Es una medida indirecta de la fuerza requerida por las raíces para penetrar los poros o los canales del suelo, o para deformar su estructura y avanzar en el medio poroso a fin de asegurar soporte, y absorber agua y nutrientes (Medvedev, 2009; Medina *et al.*, 2012).

La resistencia del suelo a la penetración se atribuye a las fuerzas cohesivas entre las partículas y su resistencia a la fricción para deslizarse unas sobre otras (Bengough *et al.*, 2011 citados por Vanags *et al.*, 2004). Depende de: la densidad aparente, el contenido y potencial de humedad, la textura, la estructura, y el contenido de materia orgánica.

La resistencia del suelo a la penetración se utiliza en estudios de densidad, traficabilidad y compactación; pues, se relaciona con el crecimiento de las

raíces, el rendimiento de los cultivos, y las propiedades físicas del suelo que se ven afectadas por los implementos agrícolas (Flores y Alcalá, 2010). Su valor es un indicador de la interacción suelo - raíces (Kulkarni *et al.*, 2010).

La humedad del suelo afecta a los factores que determinan la resistencia a la penetración, que son: la resistencia a la fractura (que a su vez es función de la cohesividad y del ángulo de fricción interna) y la compresibilidad (Martino, 2012).

La resistencia mecánica del suelo a la penetración presenta variaciones espaciales (horizontal y vertical) y temporales, debido a los procesos y la gestión natural del suelo (Lomeling y Mori, 2015); por lo tanto, para realizar estimaciones precisas, se requiere un gran número de mediciones en diferentes sitios y profundidades del terreno, acompañadas por análisis espaciales posteriores (Medina *et al.*, 2012).

La resistencia del suelo a la penetración, usualmente se mide en unidades de presión [$MT^{-2}L^{-1}$]; por lo tanto, valores de 1,5 MPa reducirán el crecimiento de las raíces, y a valores mayores a 2,0 MPa habrá serias limitaciones para el desarrollo de las mismas (Kulkarni *et al.*, 2010).

El método más común para evaluar la resistencia al crecimiento de las raíces en el suelo es mediante un penetrómetro, cuyas mediciones se pueden realizar de forma relativamente rápida y fácil, dependiendo de la fuerza de corte del suelo, el grado de compactación, incluida la fricción entre el suelo y el metal (Mărunțelu y Rus, 2017). El penetrómetro simula el esfuerzo de la raíz por elongarse en el perfil de suelo, la misma que disminuye linealmente con el aumento de la resistencia a la penetración a partir de 0,7 MPa, hasta que el crecimiento se anula a 2,1 MPa (Duiker, 2005).

Generalmente, se dispone de dos tipos de penetrómetros: estáticos y dinámicos. Los primeros miden la resistencia del suelo con un desplazamiento del cono a una velocidad constante, por lo que se construyen con dispositivos motorizados para mantener la velocidad. Los segundos, se basan en la energía aplicada por el impacto de un martillo como resultado de su caída libre de una altura determinada (Vanags *et al.*, 2004; Flores y Alcalá, 2010).

Arshad *et al.*, (1996) proponen en la Tabla 3 la escala de la resistencia a la penetración, cuando el suelo tiene un contenido de humedad a capacidad de campo:

Tabla 3. Categorías de la resistencia a la penetración del suelo

Resistencia a la Penetración (MPa)	Interpretación
< 0,01	Extremadamente baja
0,01- 0,1	Muy Baja
0,1-1,0	Baja
1,0 - 2,0	Moderada
2,0 - 4,0	Alta
4,0 - 8,0	Muy alta
> 8	Extremadamente alta

1.7.2.2. Densidad aparente

La compactación del suelo destruye y debilita su estructura ocasionando un aumento de la densidad aparente (D_a) y de la resistencia mecánica a la penetración (Taboada, 2007). Además, disminuye la porosidad (densificación), principalmente de los poros grandes (macroporos), esenciales para movimiento del agua y el aire (Duiker, 2005).

La D_a es una propiedad que cambia rápidamente, ya sea por el cultivo, la erosión o por la compactación (mecánica y sobre pastoreo); además, está influenciada por el contenido de materia orgánica, la textura, la estructura, la mineralogía y la porosidad (Chaudhari *et al.*, 2013), por lo que se la utiliza como un indicador de la calidad física del suelo (Rubio, 2010). También, puede variar por los procesos de contracción y expansión dependientes del tipo de arcilla y del contenido de humedad (Albán, 2009).

Los valores más altos de D_a indican una mayor compacidad del suelo (Nawaz *et al.*, 2012); así como, un incremento del potencial matricial, y con ello de la dificultad para extraer el agua del suelo (Alameda, 2010).

La D_a es mayor en los suelos de textura gruesa debido a que los macroporos son más grandes y ocupan un mayor volumen que los suelos arcillosos; estos últimos, tienen microporos que producen compacidad (Duiker, 2002). También, la densidad aparente generalmente aumenta con la profundidad del suelo debido al menor contenido de materia orgánica y la sobrecarga de

las capas superiores. En suelos expansivos, disminuye con el aumento del contenido de humedad y viceversa (Chaudhari *et al.*, 2013).

La D_a es función de la porosidad total del suelo (Tokunaga, 2006); por lo que, un incremento en la densidad aparente produce una disminución de la porosidad (Alameda, 2010). La reducción de la porosidad implica una menor disponibilidad tanto de aire como de agua para las raíces de las plantas, disminuyendo considerablemente la actividad bioquímica y microbiológica del suelo, de lo que resulta un menor desarrollo del sistema radical de las plantas; y, por ende, una menor producción (McKenzie, 2010).

1.8. Afectación de los recursos naturales por la ganadería

El sector pecuario a nivel mundial representa el 40% del producto interno bruto (PIB) agrícola, generando empleo para mil trescientos millones de personas y medios de subsistencia para mil millones (Steinfeld *et al.*, 2009). La ganadería es la actividad humana que ocupa la mayor superficie de la tierra, ya que a ésta se destina aproximadamente el 30% de la superficie terrestre libre de hielo. A la producción ganadera le corresponde el 70% de las tierras agrícolas (pastos y forrajes) (Mora *et al.*, 2017), equivalente a 3 400 millones de hectáreas (Gálvez, 2016), de los cuales el 73% están situadas en zonas áridas y semiáridas (FAO, 2009).

A pesar de las ventajas señaladas, la expansión de la ganadería se ha posesionado sobre tierras apropiadas para usos agrícolas y forestales, trayendo como consecuencia la evidente subutilización e ineficiencia en el uso y manejo de los recursos naturales, lo cual repercute en los campos técnico, social, económico y ambiental (Mora *et al.*, 2017). En las últimas décadas, el hombre ha aumentado las áreas destinadas al pastoreo del ganado en sistemas de ganadería extensiva, provocando deforestación y deterioro de los ecosistemas naturales; ya que, durante el proceso de transformación y simplificación de bosques hacia monocultivos de pasto, se han afectado y reducido organismos y procesos básicos para el funcionamiento del sistema productivo y el ecosistema (Zuluaga *et al.*, 2011).

Ruiz y Gz - Jamica (2012) afirman que la actividad ganadera es una de las principales causas de los problemas ambientales más apremiantes del mundo, como el calentamiento del planeta, la degradación de las tierras, la pérdida de la biodiversidad, la contaminación atmosférica y del agua; así, es responsable

del 9% del anhídrido carbónico (CO_2) que se libera a la atmósfera; del 65% del óxido nítrico (N_2O) procedente del estiércol que tiene un potencial de calentamiento global (PCG) 296 veces mayor que el CO_2 ; del 37% de metano (CH_4) procedente de la fermentación entérica de los rumiantes, cuyo PCG es 23 veces mayor que el CO_2 ; y, del 64% de amoníaco (NH_3) que contribuye significativamente a la lluvia ácida y a la acidificación de los ecosistemas.

Cuando se talan bosques para establecer pasturas se transforman los hábitats y ecosistemas naturales, se introducen especies vegetales o animales traídas de otros ecosistemas, presentando problemas de adaptación o volviéndose agresivas, afectando las especies nativas (Libreros, 2015).

El pastoreo directo establece una serie de acciones entre el animal y el ecosistema, que generan modificaciones en las características de la vegetación y del suelo (Murgeito, 2003). Taboada (2007), anota que el pastoreo directo ejerce dos tipos de efectos sobre el suelo: a) la defoliación, causada por la ingesta de forraje por los animales; y, b) el pisoteo, originado por el tránsito de ganado, los mismos que pueden generar importantes cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos.

Una de las acciones más negativas de la ganadería sobre el suelo es el sobrepastoreo, ya que genera compactación, que es la pérdida de la estructura debido al peso de los animales y a sus pezuñas (Libreros, 2015). El exceso de ganado afecta al suelo, tanto de manera directa por medio del pisoteo continuo, como indirecta, a través de la pérdida o degradación de la cubierta vegetal, que lo deja expuesto a los agentes de erosión (Murgeito, 2003). El pisoteo exagerado del animal cuando el suelo tiene un contenido de humedad en el rango del 20 al 30% inevitablemente producirá compactación (Machecha, 2002). La compactación de las pasturas genera la reducción del volumen del suelo, aumenta la densidad aparente, pérdida de la macroporosidad; y, consecuentemente, problemas en el crecimiento y desarrollo de las raíces (Abu - Hamdeh, 2003). Además, afecta el hábitat de los microorganismos (Toabada, 2007).

También, el sobrepastoreo afecta negativamente al ciclo del agua, disminuyendo los caudales en las cuencas e impidiendo que se recuperen los acuíferos (Zuluaga *et al.*, 2011). Debido a los desechos de los animales (estiércol y orines) se pierde la calidad del agua, lo que conlleva a su polución y eutrofización (FAO, 2009), con tremendos problemas en el agua embalsada.

León (2006) menciona que la causa para la degradación de las pasturas radica en el manejo y tipo de especies utilizadas, así como, el establecimiento de pastizales en terrenos con topografía y clima extremos. Ello, según Rivera (2003) afecta de forma negativa el flujo del agua a través del perfil y la estabilidad estructural, procesos que causan erosión superficial y deslizamientos del terreno.

La degradación de las praderas se concibe como una reducción en la proporción de especies forrajeras deseables y la disminución en la capacidad productiva de las especies vegetales de mayor valor forrajero, con un incremento en la población de malezas y baja calidad nutritiva del forraje; por lo cual, la capacidad de carga y la producción animal se reducen considerablemente, con repercusiones importantes en los costos de producción y en la calidad de los productos animales que recibe el consumidor (Cuesta *et al.*, 2005).

De acuerdo con la ubicación de las capas endurecidas en el perfil del suelo y con su origen, se reconocen dos tipos de compactación en los terrenos de las praderas: pie de arado y pie de pezuña. El pie de arado se caracteriza por presentar la capa endurecida a más de 20 cm de profundidad, la cual generalmente es causada en la producción recurrente de cultivos anuales manejados con labranza convencional, que luego pasan a la actividad ganadera. En cambio, en el pie de pezuña, la capa problema ocurre en los primeros 10 cm del suelo, la cual generalmente está asociada con el pisoteo del ganado durante el pastoreo (Zerpa *et al.*, 2013).

Los efectos del pastoreo por el ganado difieren en su intensidad y duración, los cuales son afectados por el suelo, la vegetación y los animales. Los factores de la vegetación son: el volumen de biomasa, su estructura o arquitectura (césped, matas, etc.), y la calidad del forraje ofrecido (palatabilidad y digestibilidad). Los factores relacionados con los animales son: el tipo de animal (vacuno, ovino, etc.), edad, carga animal, y la duración de los periodos de pastoreo y descanso (Keller, 2004).

El efecto del tránsito de hacienda está relacionado con las presiones ejercidas sobre el suelo; las cuales, a la vez, están en función de la masa del animal, el tamaño de su pezuña y la energía cinética (Medina, 2016). Al respecto, las presiones ejercidas por los ovinos y los vacunos cuando están parados promedian entre 66 y 138 kPa, respectivamente, pudiéndose incrementar al doble cuando el animal se encuentra en movimiento. Estas presiones son equiparables a las ejercidas por las ruedas de tractores no cargados (74 - 81

kPa), y las presiones de tracción (58 kPa) de vehículos arrastrados (Taboada, 2007).

Las prácticas inapropiadas de manejo de la ganadería han llevado a una degradación acelerada del suelo por compactación y erosión, convirtiéndola en una actividad ambientalmente insostenible. También, se hace muy costosa económicamente, pues al tener que incrementar el consumo de suplementos y concentrados disminuye seriamente su productividad en el largo plazo, trayendo como consecuencia la disminución en los ingresos de los productores.

La introducción de sistemas silvopastoriles, es una opción de producción pecuaria sostenible (control de la erosión y producción eficiente sin perjudicar los recursos naturales), donde los árboles y arbustos interactúan con forrajeras, herbáceas y los animales, bajo un esquema integral, con efectos positivos sobre el suelo, el reciclaje de los nutrientes, la fijación de nitrógeno, la profundización de las raíces, y la actividad biológica de la micro y macro fauna (Machecha, 2002).

2. El Sistema de Riego Santiago

El sistema de Riego Santiago se inserta en un ambiente montañoso, con terrenos ondulados e inclinados y pocos espacios planos. Según el estudio realizado por Bastidas y Coronel (2014), el uso del suelo en la zona de riego de Salapa se distribuye de la manera siguiente: 73,76% de la superficie se destina a pastos (*Pennisetum clandestinum*), para la producción de ganadería bovina de leche; 10,34% se encuentra ocupadas por bosque natural; 6,48% corresponde a bosques plantados; 7,27% vegetación arbustiva; y, 2,15% está ocupado por cultivos, principalmente hortalizas [col (*Brassica oleracea* var. *Capiata*); lechuga (*Lactuca sativa* L); brócoli (*Brassica oleracea* var. *Itálica*)]. Consecuentemente, del área de uso agropecuario, el 97% corresponde a pasturas y el 3% restante a hortalizas, cuya producción contribuye a abastecer principalmente el cercano mercado de la ciudad de Loja, constituyéndose así en una zona estratégica de la seguridad alimentaria y de generación de empleo productivo para la población. Su ubicación política se ilustra en la Figura 1.

2.1. Características biofísicas

2.1.1. Fisiografía y geología

La zona de influencia del Sistema de Riego Santiago la conforman varias áreas que se encuentran en la vertiente de la margen occidental del curso superior del río Zamora, en la transición entre las montañas altas y el valle estrecho de Cuxibamba de la ciudad de Loja.

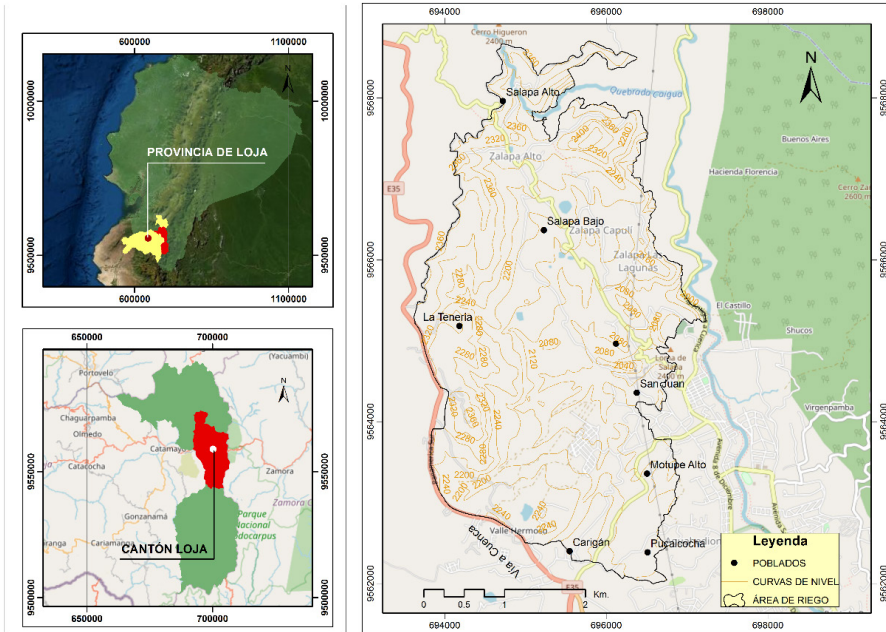


Figura 1. Ubicación del Sistema de Riego Santiago en la parroquia El Valle, cantón Loja y provincia de Loja - Ecuador

Fisiográficamente el gran paisaje corresponde al área depresional fallada de la sierra austral andina volcánica, de relieve montañoso, denudacional, con las siguientes formas del terreno:

- Ondulaciones regulares con hondonadas y áreas planas y convexas.
- Lomos y vertientes de ligera a moderadamente inclinadas
- Vertientes inclinadas, rectas, cóncavas e irregulares (PREDESUR, 1975).

Geológicamente el área de estudio se encuentra dentro de la formación Chiguinda, conformada en su mayoría por rocas metamórficas, tales como esquistos sericíticos, moscovíticos, cuarcitas, con potencias de varios metros (Bastidas y Coronel, 2014).

2.1.2. Clima y zona de vida

En la zona del Sistema de Riego Santiago no se dispone de una estación meteorológica; sin embargo, se asume que por su cercanía y altitud media, sus características climáticas generales serían similares a las registradas en la estación meteorológica de La Argelia (2 160 m s. n. m.) ubicada en los terrenos de la Universidad Nacional de Loja. En ésta, para un período de alrededor

de 50 años (1960-2009) se tienen los siguientes parámetros climáticos: precipitación promedio anual 909 mm; temperatura media mensual de 15°C; y, evapotranspiración de referencia media anual de 2,98 mm día⁻¹. De ello resulta que la clasificación bioclimática corresponde a la Zona Templada Sub-húmeda; y, según la clasificación de Koppen pertenece al clima Mesotérmico Semi-húmedo (CW). De acuerdo al Sistema de Clasificación de Formaciones Vegetales del Mundo, la zona corresponde a la zona de vida Bosque Seco Montano Bajo (PREDESUR, 1975).

Sin embargo, es pertinente mencionar que la precipitación en la zona varía considerablemente en función de la altitud, siendo mayor en los terrenos más altos cercanos al canal principal del sistema. De igual manera, la temperatura disminuye con la altitud a una tasa de 0,65°C por 100 m; y, por ende la evapotranspiración y los requerimientos de riego. Aunque no se registran días de heladas, si se presentan períodos de horas frío favorables para los frutales de clima templado.

También es muy importante indicar que durante los meses de junio, julio y agosto se produce un fenómeno climático multifactorial consistente en 1.- fuertes vientos que incrementan la deshidratación de los pastos y cultivos (por aumento de la evapotranspiración) lo que genera daño mecánico, y retraso en el crecimiento de las especies vegetales antes mencionadas; 2.- baja radiación solar, lo que repercute en menos horas luz, afectando significativamente la tasa de fotosíntesis de las praderas y cultivos, con la concomitante disminución de la biomasa vegetal en al menos 30%; 3.- bajas temperaturas combinadas con el exceso de humedad en los suelos debido a la constante llovizna.

La combinación de los fenómenos climáticos antes mencionados, también afectan negativamente la salud de los semovientes que pastorean en la zona, incrementándose la incidencia de neumonías y panadizos, lo que repercute en una disminución de la producción de leche en alrededor de 30%.

Es pertinente mencionar que los aspectos anotados deben ser tomados muy en cuenta, tanto en el diseño y operación del riego parcelario y en la administración integrada del Sistema de Riego Santiago, como en el manejo del ganado y los potreros.

2.1.3. Suelos

En el estudio de Factibilidad del Proyecto de Riego Santiago (PREDESUR, 1975) se indica que se han mapeado los suelos de los sectores de: Salapa, La Tenería, La Banda y Motupe, cubriendo una superficie total de 1 918 ha, mediante la realización de 450 barrenaciones y la descripción de 50 perfiles, habiéndose identificado 12 series de suelos. Las áreas de pendiente superior a 40% han sido clasificadas como tierras misceláneas, cuya vocación se enmarca en el aprovechamiento forestal y la protección de las microcuencas, por lo que no se han considerado para el uso con riego; consecuentemente, las tierras aptas para el riego pertenecen a las clases agrológicas 2, 3 y 4 las cuales cubren una superficie de 1 358 ha equivalente al 70,8% del área estudiada.

Los suelos de la Serie Salapa, identificada en el referido estudio, cuyo perfil representativo se encuentra a una altitud de 2 230 m s. n. m. se han formado a partir de roca metamórfica con presencia de cuarzo. Se reporta que son muy profundos, imperfectamente drenados en el interior debido a la dominancia de materiales finos (arcilla) dentro del perfil, químicamente muy pobres por sus bajos contenidos de materia orgánica y de nitrógeno; y, por su muy baja disponibilidad de fósforo y potasio.

García (2015) encontró que en el área de Salapa (Junta 2) del Sistema de Riego Santiago, la reacción del suelo ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) disminuyó con la altitud, desde ligeramente ácido, medianamente ácido y fuertemente ácido, para los rangos de 2 000 - 2 200 m s. n. m.; 2 200 - 2 400 m s. n. m.; y, 2 400 - 2 600 m s. n. m. respectivamente. Por su parte, el contenido de Al^{3+} se incrementa con la altitud desde el rango medio (2 000 - 2 400 m s. n. m.) a alto (2 400 - 2 600 m s. n. m.).

2.1.4. Fuentes hídricas del Sistema de Riego Santiago

El Sistema de Riego Santiago es parte de sistema hidrográfico Vertiente A. Amazonas, sistema A30 Santiago, cuenca A3078 río Santiago, subcuenca A307801 Alto Zamora; microcuenca sin división (río Santiago afluente del río San Lucas). El río Santiago nace a una altitud aproximada de 3 560 m s. n. m. a 30 km al norte de la ciudad de Loja (SENAGUA, 2011).

La obra de toma del Sistema de Riego Santiago se ubica en la cota 2 425 m s. n. m. en las coordenadas geográficas $03^{\circ} 47' 12''$ S y $79^{\circ} 17' 13''$ W; es de tipo convencional para un caudal captado de $1,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El canal principal tiene una

longitud de 40,6 km con una sección promedio de 1,44 m² y desciende desde la cota 2 404 a la 2 352 m s. n. m. para abastecer una potencial área regable de 1 358 ha definida en el estudio de suelos. La obra de toma y el canal principal fueron construidos por PREDESUR, con fondos provenientes del Plan Inmediato de Riego de la Provincia de Loja, los mismos que actualmente por negligencia de algunos diputados lojanos se han perdido, causando un tremendo perjuicio al desarrollo agrario de la provincia.

En la resolución del 25 de marzo del 2011 emitida por el Subsecretario Regional de la Demarcación Hidrográfica Santiago, del Centro Zonal de Loja, de la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA, 2011), se indica que debido a que al Sistema de Riego Santiago no ingresan las aguas del río Santiago, por encontrarse el canal principal en su inicio destruido en una longitud de 120 metros, el mismo que debe ser reconstruido, sin haber recursos actualmente para ello, se autoriza el uso y aprovechamiento de los caudales de las siguientes fuentes que cruzan perpendicularmente el canal principal: río Santiago (382 l s⁻¹); quebrada Sayo (33 l s⁻¹); quebrada Liglla (12 l s⁻¹); quebrada Cachipira (183 l s⁻¹); quebrada El Lirio (21 l s⁻¹); quebrada No. 2 a la salida del túnel No. 3 (2 l s⁻¹); quebrada Solamar No. 1 (8 l s⁻¹); quebrada Solamar No. 2 (10 l s⁻¹); quebrada Solamar No. 3 (11 l s⁻¹); quebrada Solamar No. 4 (10 l s⁻¹); y, quebrada Solamar No. 5 (7 l s⁻¹).

El caudal total autorizado es de 679 l s⁻¹, conforme al siguiente detalle: 1.- para uso humano, uso doméstico y saneamiento de la población, 200 l s⁻¹ en beneficio del I. Municipio del Cantón Loja, que será utilizado como caudal emergente cuando el Municipio lo requiera para suplir las necesidades del Plan Maestro de Agua Potable de la ciudad de Loja. El Municipio de Loja utilizará el recurso una vez que ingrese el agua del río Santiago en el caudal autorizado (382 l s⁻¹). 2.- para riego de 958 ha con una dotación de 0,5 l s⁻¹ ha⁻¹ (riego presurizado: aspersión, microaspersión y goteo) por plazo determinado, esto es por diez años renovables, 479 l s⁻¹ en beneficio de la Junta General de Regantes del Sistema de Riego Santiago, debiendo pagar anualmente a la Demarcación Hidrográfica Santiago, Zonal Loja, el valor de \$ 388,5 por consumo de 210 l s⁻¹. El caudal sobrante de 139,5 l s⁻¹ debe correr libremente por el curso natural de cada una de las fuentes como ecológico y de servicio.

2.2. Área regada y usuarios del Sistema de Riego Santiago

En la actualidad, el área neta regada es de 482,5 ha para beneficio de 416 usuarios. Administrativamente está estructurado por cinco juntas de riego. La distribución de los usuarios en cada junta, el área regada y los sectores que cubren se presentan en el Cuadro 2.

En la Figura 2 se observa el emplazamiento del canal principal y las redes secundarias del Sistema de Riego Santiago.

Cuadro 2. Número de usuarios, área regada y sectores que componen las Juntas del Sistema de Riego Santiago

Junta No.	Número de Usuarios	Área regada (ha)	% del área	Sectores
1	1			Santiago, asimilado a la Junta 2
2	184	226	46,8	Masaca, Solamar, Salapa Alto, Salapa Bajo, San Juan y San Francisco
3	60	80	16,6	Leonpamba, Cachipamba y parte posterior de Salapa Bajo
4	101	124,5	25,8	San Agustín, parte de Motupe Alto, La Tenería y El Milagro
5	70	52	10,8	Carigán y parte de Motupe Alto
TOTAL	416	482,5	100,0	

Fuente: Secretaria del Sistema de Riego Santiago (2017)

Los datos arriba expuestos evidencian como el crecimiento demográfico de la ciudad de Loja ha reducido en alrededor del 50% el área potencialmente regable, que inicialmente fuese identificada en el estudio de suelos del Sistema de Riego Santiago.

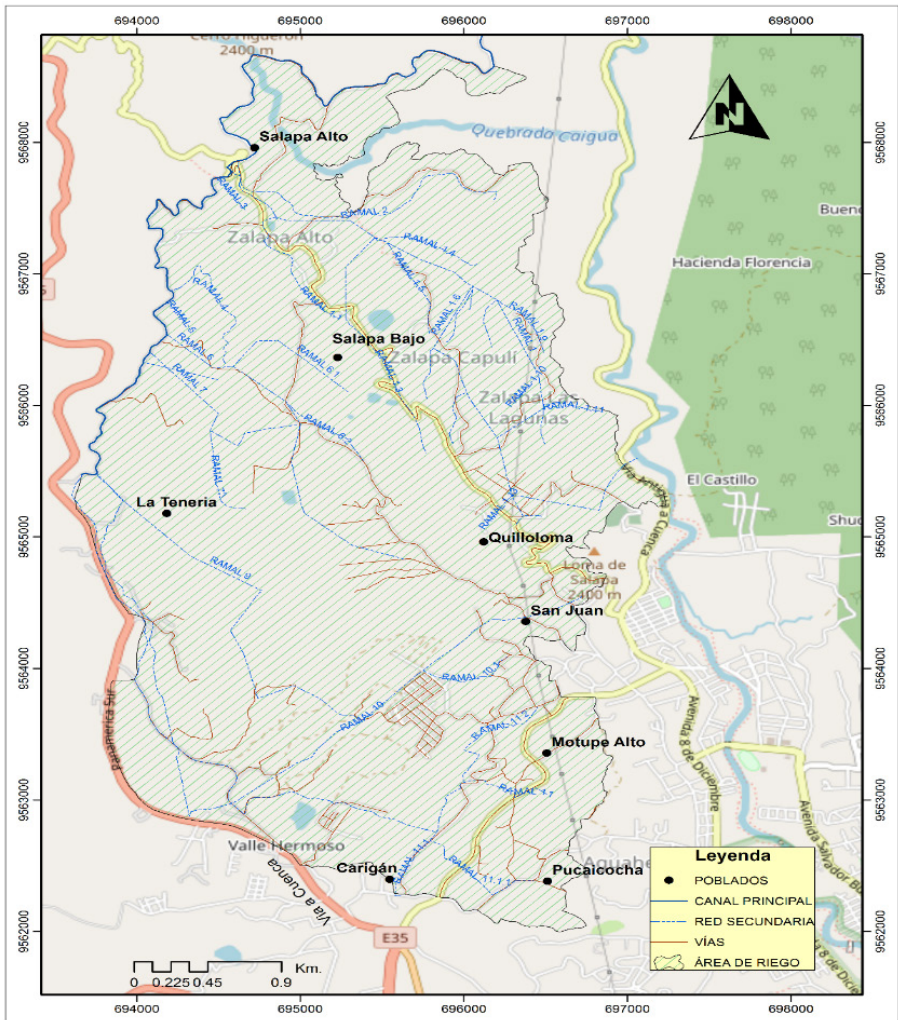


Figura 2. Canal principal y redes secundarias de las Juntas 2, 3, 4 y 5 del Sistema de Riego Santiago

Fuente: González (2018)

2.3. Estructura socio - organizativa del Sistema de Riego Santiago

Con la finalidad de unificar la administración del agua de riego de los diferentes sectores, mediante Acuerdo Nro. 089 del Ministerio de Agricultura y Ganadería del 27 de marzo del año 2002, se aprueba la personería jurídica de la Junta General de Usuarios del Sistema de Riego Santiago, con domicilio

en la parroquia El Valle, del cantón y provincia de Loja, a la cual pertenecen obligatoriamente todos los usuarios.

Por su carácter de organización comunitaria privada sin fines de lucro, administradora del agua y saneamiento, la Junta General de Usuarios del Sistema de Riego Santiago se encuentra regida por las disposiciones determinadas en: la Constitución Política de la República del Ecuador, la Ley de Aguas y su Reglamento, la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, la Ley de Compañías, la Ley de Régimen Tributario, el Código del Trabajo y las normas generales del Consejo Nacional de Recursos Hídricos.

Los objetivos de la Junta General de Usuarios del Sistema de Riego Santiago son los siguientes:

- Estrechar las relaciones de solidaridad entre sus miembros, aunando esfuerzos a fin de lograr el bienestar general de los usuarios.
- Perfeccionar la eficiencia del uso, aplicación y conservación de la calidad del agua en el sistema, previniendo su contaminación.
- Fortalecer la Junta General de Usuarios y sus vínculos con las Juntas Sectoriales de Usuarios para que participen, activa y decididamente en la administración, operación, conservación, mantenimiento y desarrollo social y/o agropecuario del área beneficiada por el sistema de riego.
- Promover la protección de las cuencas y micro cuencas y áreas de influencia hídrica, con el apoyo de organismos estatales y organismos no gubernamentales.

A la Junta General le compete emitir las normas generales y específicas para la administración del sistema de riego y más disposiciones que regulan los derechos y obligaciones de todos los usuarios, además de la protección de las microcuencas y áreas de influencia hídrica.

La estructura orgánica de la Junta General de Usuarios comprende los siguientes niveles:

- Nivel Directivo.- La Asamblea General es la máxima autoridad de la Junta General de Usuarios. Está integrada por la representación de las Juntas Directivas de cada una de las Juntas Sectoriales de

Usuarios del Sistema de Riego Santiago. Tiene la responsabilidad de aprobar los estatutos y regulaciones que sean necesarios para la buena administración del sistema; así como, determinar las cuotas que demanden su funcionamiento administrativo y los gastos de operación, mantenimiento y mejoramiento del sistema de riego.

- Nivel Ejecutivo.- Está representado por la Junta Directiva, encargada de llevar el control y fiscalización de los recursos de la Junta General; así como, suscribir los contratos y convenios necesarios. La Junta Directiva se encuentra integrada por: Presidente, Vicepresidente, Secretario, Tesorero; y, cuatro Vocales principales con sus correspondientes suplentes.
- Nivel Asesor.- Representante Legal o Procurador Síndico, encargado de defender judicial y extrajudicial los derechos e intereses de la Junta General.
- Nivel Auxiliar.- Secretaria - Recaudadora, encargada del cobro de las tarifas de consumo de agua y demás disposiciones que emita la Asamblea General.
- Nivel Operativo.- Canalleros, encargados de la conservación y mantenimiento del sistema de riego.

Cada Junta de Riego tiene un Directorio, el mismo que está compuesto por: Presidente, Vicepresidente, Tesorero, Secretario y Vocales principales y suplentes. Los integrantes del Directorio, tanto de la Junta General como de las Juntas Sectoriales, son elegidos cada año.

El Directorio de la Junta General se elige de entre todos los integrantes de los Directorios de las Juntas Sectoriales, mediante votación general, secreta y obligatoria de todos los usuarios del sistema de riego.

2.4. Operación y mantenimiento del Sistema de Riego Santiago

El 26 de abril de 2006 se suscribió el Convenio de Transferencia para la Administración, Uso, Goce y Mantenimiento del Sistema de Riego Santiago, entre la Subcomisión Ecuatoriana PREDESUR y la Junta General de Usuarios.

Los usuarios de las Juntas de Riego 2, 3 y 4 toman el agua a la demanda; mientras que, los usuarios de la Junta 5 lo hacen por turnos, debido a la menor disponibilidad del recurso hídrico por encontrarse en la cola del sistema.

La Junta General de Riego se encarga de dar el mantenimiento a las obras de captación y al canal principal. Cada Junta de Riego administra y opera independientemente su sector; sin embargo, en caso de que ésta no pueda solucionar el mantenimiento de su zona, es auxiliada por la Junta General.

La tarifa anual por el uso del agua es de \$ 28 ha⁻¹ valor que se paga en la Tesorería de la Junta General. Además, se cobran multas por no participar en las mingas (\$ 20) por inasistencia tanto a la sesión de elección del Directorio (\$ 25) como a las sesiones convocadas (\$ 10). Por su parte, cada Junta de Riego tiene sus reglas específicas con respecto a sanciones.

2.5. Riego parcelario

El riego parcelario presurizado que se viene practicando dista de tener un soporte científico-técnico, dado que los usuarios al no disponer del diseño de riego (agronómico e hidráulico) para sus parcelas, luego de conducir el agua a las mismas mediante mangueras de polietileno desde las redes terciarias, han adquirido en el mercado local los aspersores, microaspersores y goteros a criterio del vendedor, sin observar, entre otros aspectos, las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y sus características hidrodinámicas, las condiciones climáticas, el tipo de cultivo, los requerimientos hídricos de los cultivos, la carga hidráulica disponible, la velocidad y dirección del viento, y el caudal asignado; consecuentemente, la práctica de riego se realiza sin considerar la lámina, el tiempo y la frecuencia de riego, generando un riego excesivo (mayoría de usuarios), lo que se traduce en: pérdida de agua, alta escorrentía superficial, erosión del suelo en terrenos inclinados, anegamiento en las partes planas, pérdida de nutrientes por lixiviación, contaminación de aguas subterráneas; y, deslizamientos en masa en algunos sectores (Figura 3). Bastidas y Coronel (2014) han identificado 21 deslizamientos en masa en el área de Salapa atribuidos al exceso de humedad. En cambio, en otras áreas, el riego es insuficiente con el concomitante escaso desarrollo de la planta y la reducción de la producción.

Lo expuesto evidencia la discontinuidad de las estrategias de desarrollo agropecuario para la zona por parte de la institución que inicialmente

promovió el proyecto, al no asistir en el diseño de riego parcelario, ni capacitar a los productores sobre esta tecnología.



Figura 3. Deslizamiento en masa en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago.
Fuente: Bastidas y Coronel (2014)

3.

Comportamiento Hidrodinámico del Suelo en el Área de Riego de Salapa, en Relación al Uso de la Tierra y Pendiente del Terreno

En esta sección se sintetizan los resultados del estudio denominado *Influencia del uso del suelo y la Pendiente del Terreno sobre el Comportamiento Hidrodinámico del Suelo en el Área de Riego de Salapa*, que se realizó en seis sitios representativos, producto de la interacción de dos usos del suelo (pastos y hortalizas) y tres rangos de pendiente (0 - 8% plano a ondulado; 8 - 16% fuertemente ondulado; y, > 16 % colinado) a lo largo de un rango de altitud que va de 2 140 a 2 350 m s. n. m. en el que se cumplieron las siguientes actividades: 1.- descripción de un perfil del suelo en cada uno de los sitios seleccionados; 2.- toma de muestras alteradas e inalteradas de las capas y horizontes de los suelos; 3.- análisis físico - químico y de retención de humedad de las muestras en el laboratorio; 4.- pruebas in situ de infiltración y conductividad hidráulica saturada, y, 5.- pruebas de resistencia a la penetración de la capa superficial del suelo.

3.1. Ubicación de perfiles de suelo, forma del terreno, drenaje y grado de erosión

En la Figura 4 se presenta el área de riego de Salapa, en la cual, en seis sitios representativos se estudió el efecto del uso del suelo y la pendiente del terreno sobre las características hidrodinámicas del suelo, cuyo punto central geográficamente se encuentra en las siguientes coordenadas: latitud sur 03°05'54"; y, longitud oeste 79°13'58".

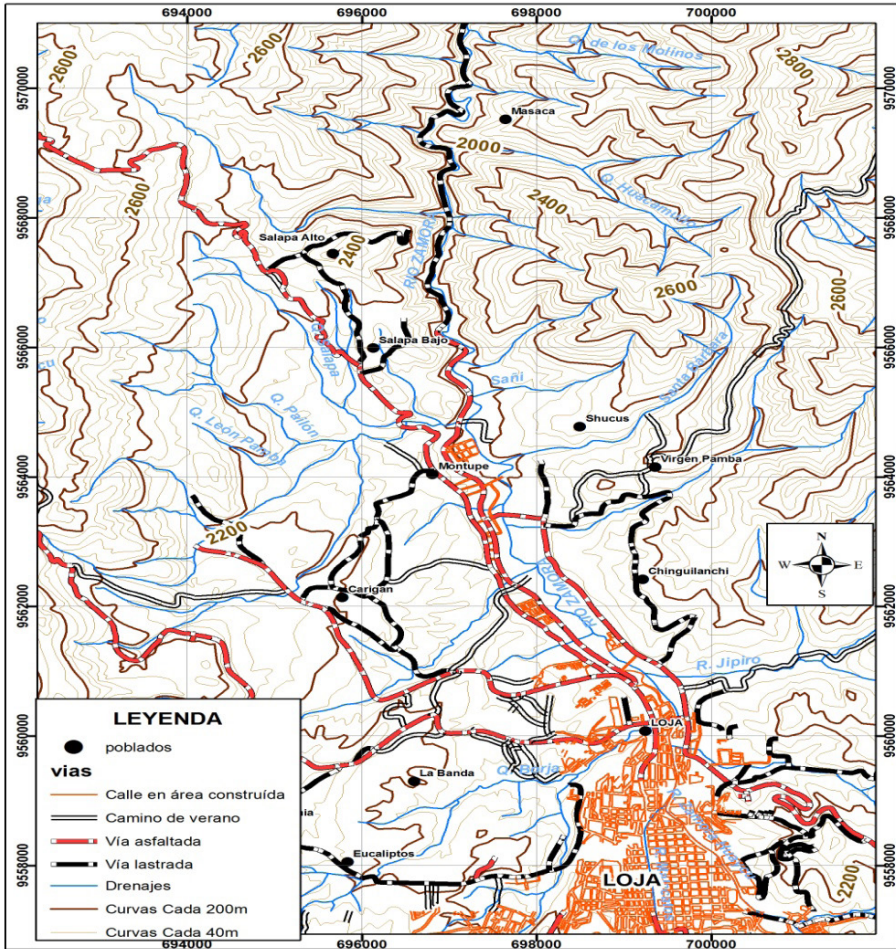


Figura 4. Ubicación del área de Salapa del Sistema de Riego Santiago

El área de riego de Salapa se divide en dos pisos: Salapa Bajo y Salapa Alto; en virtud de ello, cuatro de los seis perfiles de suelo estudiados se ubican en Salapa Bajo (P1Z, P2Z, P3Z y P4Z: < 2 250 m s. n. m.) y los dos restantes en Salapa Alto (P5Z y P6Z: 2 250 - 2 350 m s. n. m.). La localización y características generales de los sitios del entorno de los referidos perfiles se resumen en el Cuadro 3; en tanto que, las fichas de descripción detallada correspondiente a cada uno de los perfiles de suelo se presentan en el Anexo 1.

El material parental de los primeros cuatro perfiles corresponde a filitas con pequeñas incrustaciones de cuarzo; en tanto que, en los perfiles P5Z y P6Z el material parental es filitas y pizarras.

El color de las capas de los suelos estudiados evidencian que el drenaje interno varía desde algo pobre a moderado. La condición de drenaje algo pobre (P1Z, P2Z y P5Z) está determinada por la presencia a poca profundidad de un horizonte predominantemente arcilloso, en el que se cuelga el agua de lluvia o de riego, generando condiciones temporales alternas de oxidación o reducción.

La profundidad efectiva actual, que corresponde al espesor del suelo en el cual se extienden las raíces para tomar agua y nutrientes en los seis perfiles estudiados, está determinada tanto por el uso del terreno como por el material parental del suelo. Así, en todos los casos los menores valores de este parámetro corresponden al uso con hortalizas (16 a 40 cm, en los perfiles P3Z y P2Z, respectivamente); en tanto que, es mayor en los pastos (40 a 55 cm en los perfiles P4Z y P1Z, en su orden). También es mayor en el perfil P6Z (100 cm), desarrollado sobre filitas lutitas en un terreno casi plano; no así, en el perfil P5Z, en el cual la presencia de un horizonte arcilloso alternativamente saturado impide la penetración de las raíces a los horizontes inferiores.

En los seis perfiles el grado de erosión hídrica de los suelos está determinado por el uso del suelo y la pendiente del terreno. Así, el mayor grado de erosión laminar corresponde al uso con hortalizas (P2Z y P3Z) y el menor a los pastos (P1Z y P4Z). También la erosión es menor en los terrenos más planos (P5Z y P6Z).

Cuadro 3. Ubicación y características generales de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago

Código del Perfil	Uso del suelo	Coordenadas UTM	Altitud m s.n.m	Pendiente %	Forma del terreno	Material Parental	Drenaje Interno	Profundidad efectiva actual cm	Grado de Erosión
P1Z	Pasto	170679091 E 9 521605 N	2 145	28	Ladera inclinada en colina	Filitas con cuarzo	Algo pobre	55	Laminar moderada, 50% del A
P2Z	Hortalizas	170696121 E 9565501 N	2 139	20	Ladera Inclinada en colina	Filitas con cuarzo	Algo pobre	30	Laminar severa, 80% del A
P3Z	Hortalizas	170696294 E 9566493 N	2 215	12	Vertiente media fuertemente ondulada	Filitas	Moderado	16	Laminar muy severa, A y 50% del B
P4Z	Pasto	170696335 E 9 566525 N.	2 220	14	Vertiente media fuertemente ondulada	Filitas con cuarzo	Moderado	40	Laminar ligera, <25% A
P5Z	Pasto	170694911 E 9 567293 N	2 328	3	Rellano, plana a ondulada	Filitas y lutitas	Algo Pobre	30	Ninguna
P6Z	Hortalizas	170694700 E 9 567690 N	2 349	7	Pie de vertiente plana a ondulada	Filitas	Moderado	80	Laminar ligera. <25% A

3.2. Características morfológicas y físico-químicas de los suelos

3.2.1. Perfil P1Z (uso: pastos; pendiente del terreno: 28%)

3.2.1.1. Descripción general del perfil

Suelo muy profundo constituido por: un horizonte Ap de 15 cm de espesor (50% erosionado) pardo amarillento oscuro, arcillo - limoso al tacto; un horizonte AE de 20 cm de espesor, pardo amarillento oscuro, con 30% de manchas rojo oscuro de óxido - reducción, franco arcillo limoso al tacto, con presencia de gravilla de cuarzo; un horizonte Bth, de 20 cm de espesor, pardo oscuro, con 30% de manchas pardo amarillentas, arcilloso al tacto, con bloques angulares grandes de fuerte desarrollo en los cuales se evidencia inmigración de arcilla y humus; un horizonte de transición CB de 15 cm de espesor, pardo amarillento, con 15% de manchas pardas, arcilloso; y, un horizonte C de más de 30 cm de espesor, pardo amarillento, con 10% de manchas pardo amarillentas, franco arcillo limoso a franco limoso al tacto. Las raíces finas y pocas se extienden hasta 55 cm por lo que se asume que corresponde a la profundidad efectiva actual. Sin reacción al HCl (10%) consecuentemente no hay presencia de carbonatos. El drenaje algo pobre se debe a que el agua de lluvia o de riego se cuelga sobre el horizonte AE (Figura 5).



Figura 5. Perfil P1Z

3.2.1.2. Características físico - químicas

Según los análisis del laboratorio (Cuadro 4) el suelo es de textura pesada (arcillosa) en todas las capas del perfil. El contenido de arcilla se incrementa desde 44% en los dos horizontes superiores hasta 54% en los horizontes Bth y BC (18,5%) para luego disminuir en el horizonte C lo que confirma que se ha producido una migración de arcilla desde el horizonte superior por procesos de eluviación. El pH disminuye progresivamente con la profundidad, desde 6,1 (ligeramente ácido) en el horizonte Ap hasta 5,5 (fuertemente ácido) en el horizonte C. La acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) se ubica en el rango medio [0,62 - 1,45 meq (100g)⁻¹]³ en los dos primeros horizontes, pero se incrementa bruscamente a un nivel muy alto (tóxico) a partir de los 35 cm [8,90 - 9,21 meq (100g)⁻¹]. Finalmente, el contenido de materia orgánica disminuye progresivamente con la profundidad, desde 4,66% (alto) en el horizonte Ap hasta 1,25% (bajo) en el horizonte C.

Cuadro 4. Textura, pH, acidez cambiante y materia orgánica del perfil P1Z

Horizonte	Profundidad cm	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural	pH _(H2O)	H ⁺ + Al ³⁺ meq (100g) ⁻¹	MO %
Ap	00 – 15	28	28	44	Ac	6,1	0,62	4,66
AE	15 – 35	28	28	44	Ac	5,9	1,45	3,38
Bth	35 – 55	28	18	54	Ac	5,4	8,90	1,63
BC	55 – 70	26	20	54	Ac	5,5	9,21	1,39
C	70 – 120+	28	24	48	Ac	5,5	9,01	1,25

3.2.2. Perfil P2Z (uso: hortalizas; pendiente del terreno: 20%)

3.2.2.1. Descripción general del perfil

Suelo muy profundo constituido por: un muy delgado horizonte Ap de 5 cm de espesor (remanente del horizonte A original erosionado en 80%) pardo oscuro, arcillo - limoso al tacto; un horizonte Bth de 25 cm de espesor, pardo oscuro, con 10% de manchas pardo amarillentas, arcilloso al tacto, con bloques subangulares grandes de fuerte desarrollo en los cuales se evidencia inmigración de arcilla y humus; un horizonte de transición BCh de 35 cm de espesor, pardo amarillento, con 10% de manchas pardo grisáceo oscuras, arcillo limoso al tacto; y, un horizonte C de más de 35 cm de espesor, pardo amarillento, con

³ 1meq/100 g = 1 cmol (+) Kg⁻¹

10% de manchas amarillo parduzcas, franco limoso al tacto. Las raíces finas y pocas se extienden hasta 30 cm. Sin presencia de carbonatos. En la superficie se observan grietas o fisuras de 5 mm de ancho que se extienden hasta 30 cm de profundidad, distanciadas entre 15 a 20 cm unas de otras (Figura 6).



Figura 6. Perfil P2Z

3.2.2.2. Características físico - química

Los resultados de los análisis de laboratorio (Cuadro 5) indican que el suelo es de textura pesada (arcillosa) en los dos horizontes superiores (remanentes de procesos anteriores de eluviación). El contenido de arcilla disminuye en los dos horizontes inferiores por lo que la textura es media (franco arcillosa a franca). El pH disminuye progresivamente con la profundidad, desde 6,7 (muy ligeramente ácido) en el horizonte Ap hasta 5,4 (fuertemente ácido) en el horizonte C. La acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) es baja en los dos primeros horizontes, pero se incrementa bruscamente a un nivel muy alto (tóxico) en los dos horizontes inferiores [4,47 - 5,71 meq (100g)⁻¹]. El contenido de materia orgánica disminuye progresivamente con la profundidad desde 3,0% (medio) en el horizonte Ap hasta 1,3 % (bajo) en el horizonte C.

Cuadro 5. Textura, pH, acidez cambiante y contenido de materia orgánica del perfil P2Z

Horizonte	Profundidad cm	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural	pH _(H2O)	H ⁺ + Al ³⁺ meq (100g) ⁻¹	MO %
Ap	00 – 05	34	24	42	Ac	6,7	0,26	3,0
Bth	05 – 30	30	30	40	Ac	5,8	0,45	2,91
Bch	30 – 65	40	28	32	FoAc	5,2	5,71	1,63
C	65 – 120+	48	32	20	Fo	5,4	4,47	1,30

3.2.3. Perfil P3Z (uso: hortalizas; pendiente del terreno: 12%)

3.2.3.1. Descripción general del perfil

Suelo muy profundo constituido por: un muy delgado horizonte Ap de 6 cm de espesor que corresponde a remanentes del originalmente horizonte B, pardo amarillento oscuro, franco arcillo limoso al tacto; un horizonte Bt de 10 cm de espesor, mezclado con una parte del Ap, pardo oscuro, con 20% de manchas amarillo parduzcas, arcillo limoso al tacto, con bloques subangulares medios de fuerte desarrollo en los cuales se evidencia inmigración de arcilla; y, un horizonte C de más de 100 cm de espesor, pardo amarillento, con 5% de manchas amarillo rojizas, franco limoso al tacto, en el cual se observan vestigios de la laminación de las filitas. Las raíces finas y pocas se extienden hasta 16 cm. Sin presencia de carbonatos (Figura 7).



Figura 7. Perfil P3Z

3.2.3.2. Características físico - químicas

Según los análisis del laboratorio (Cuadro 6) el suelo es de textura pesada (arcillosa) en el horizonte superior; el contenido de arcilla disminuye marcadamente en los horizontes inferiores, que son de textura media (franco arcilloso a franco arcillo arenoso). El pH es medianamente ácido (5,7) en los dos horizontes superiores y muy fuertemente ácido (5,1) en el horizonte inferior. La acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) es baja [0,64 - 0,79 meq (100g)⁻¹] en los dos primeros horizontes, pero se incrementa bruscamente al rango de muy alto (tóxico) en el horizonte inferior [9,18 meq (100g)⁻¹]. El contenido de materia orgánica disminuye progresivamente con la profundidad desde 3,3% (medio) en el horizonte Ap hasta 1,3 % (bajo) en el horizonte C.

Cuadro 6. Textura, pH, acidez cambiante y contenido de materia orgánica del perfil P3Z

Horizonte	Profundidad cm	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural	pH _(H2O)	H ⁺ + Al ³⁺ meq (100g) ⁻¹	MO %
Ap	00 - 06	32	26	42	Ac	5,7	0,64	3,33
Bt	06 - 16	34	32	34	FoAc	5,7	0,79	2,95
C	16 - 120+	52	24	24	FoAcAo	5,1	9,18	1,30

3.2.4. Perfil P4Z (uso: pastos; pendiente del terreno: 14%)

3.2.4.1. Descripción general del perfil

Suelo muy profundo, constituido por: un delgado horizonte Ap de 6 cm de espesor, pardo, franco limoso al tacto; un horizonte AB de 16 cm de espesor, pardo, franco arcillo limoso, con presencia de fragmentos pequeños de cuarzo, desnudos; un horizonte BC de 18 cm de espesor, pardo, con 50% de manchas amarillo parduzco, arcillo limoso al tacto, con bloques angulares grandes de fuerte desarrollo, en los cuales se evidencia inmigración de arcilla; y, un horizonte C de más de 80 cm de espesor, amarillo parduzco, con 10% de manchas grandes rojo oscuras, franco limoso al tacto. Las raíces finas y pocas se extienden hasta 40 cm por lo que se asume que corresponde a la profundidad efectiva actual. Sin presencia de carbonatos (Figura 8).



Figura 8. Perfil P4Z

3.2.4.2. Características físico - químicas

Según los análisis de laboratorio (Cuadro 7) los horizontes AE y BC son de textura pesada (arcillosa) disminuyendo el contenido de arcilla en los horizontes Ap y C. El pH decrece progresivamente con la profundidad, desde 6,1 (ligeramente ácido) en el horizonte Ap hasta 5,5 (fuertemente ácido) en el horizonte C. La acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) es baja [$0,45 \text{ meq } (100 \text{ g})^{-1}$] en el horizonte Ap pero se incrementa bruscamente a un rango muy alto (tóxico) en los dos horizontes inferiores [$6,65 - 10,08 \text{ meq } (100\text{g})^{-1}$]. El contenido de materia orgánica disminuye progresivamente con la profundidad desde 7,65% (muy alto) en el horizonte Ap hasta 1,35 % (bajo) en el horizonte C.

Cuadro 7. Textura, pH, acidez cambiante y contenido de materia orgánica del perfil P4Z

Horizonte	Profundidad cm	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural	pH _(H2O)	H ⁺ + Al ³⁺ meq (100g) ⁻¹	MO %
Ap	00 - 06	32	34	34	FoAc	6,1	0,45	7,65
AE	06 - 22	30	28	42	Ac	5,3	2,22	4,66
BC	22 - 40	22	20	58	Ac	5,7	6,65	2,72
C	40 - 120+	40	24	36	FoAc	5,5	10,08	1,35

3.2.5. Perfil P5Z (uso: pastos; pendiente del terreno: 3%)

3.2.5.1. Descripción general del perfil

Suelo muy profundo constituido por: un horizonte Ap de 8 cm de espesor, pardo grisáceo muy oscuro, arcillo limoso al tacto; un horizonte AB de 7 cm de espesor, pardo grisáceo muy oscuro con 40% de manchas rojizas; arcilloso; un horizonte Bt de 15 cm de espesor, pardo amarillento oscuro, con 10% de manchas pardo oscuro, arcilloso al tacto, con bloques subangulares medios y finos en los cuales se evidencia procesos de óxido - reducción; un horizonte BC1 de 23 cm de espesor, pardo amarillento oscuro con 50% de manchas grandes amarillo parduzco, franco arcillo arenoso; un horizonte BC2 de 17 cm de espesor, pardo amarillento oscuro, con manchas rojo pálido, grandes y definidas, arcillo limoso y, un horizonte C de más de 50 cm de espesor, blanco con 30% de manchas pardo fuerte y 20% rojo amarillentas, franco arcillo arenoso al tacto, con colores blanco rosado (50%) pardo fuerte (30%) y rojo amarillento (20%); franco arcillo arenoso al tacto. Las raíces finas y pocas se extienden solamente hasta 30 cm. Sin presencia de carbonatos. El agua de lluvia o de riego se cuelga en la parte superior del horizonte Bt y determina condiciones de óxido - reducción en el horizonte AB (Figura 9).



Figura 9. Perfil P5Z

3.2.5.2. Características físico - químicas

Los resultados de los análisis de laboratorio (Cuadro 8) indican que el suelo es de textura pesada (arcillosa) en los horizontes internos y de textura media (franco) en el horizonte superior, situación que afirma una migración de arcilla por procesos de eluviación. El pH es fuertemente ácido (5,0 - 5,1) en los cuatro horizontes superiores, y desciende al rango muy fuertemente ácido (4,7 - 4,9) en los dos horizontes inferiores. La acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) es muy alta en todo el perfil, incrementándose a un rango extremadamente tóxico en los horizontes internos [13,5 - 79,1 meq (100g)⁻¹]. El contenido de materia orgánica disminuye progresivamente con la profundidad, desde 8,08% (muy alto) en el horizonte Ap hasta 1,35 % (bajo) en el horizonte C.

Cuadro 8. Textura, pH, acidez cambiante y contenido de materia orgánica del perfil P5Z

Horizonte	Profundidad cm	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural	pH _(H2O)	H ⁺ + Al ³⁺ meq (100g) ⁻¹	MO %
Ap	00 - 08	36	38	26	Fo	5,0	8,05	8,08
AB	08 - 15	26	28	46	Ac	5,1	13,5	5,61
Bt	15 - 30	22	224	54	Ac	5,1	14,76	2,72
BC1	30 - 53	28	26	46	Ac	5,0	17,62	1,87
BC2	53 - 70	22	26	52	Ac	4,9	21,36	1,58
C	70 - 120+	42	20	38	FoAc	4,7	76,09	1,35

3.2.6. Perfil P6Z (uso: hortalizas; pendiente del terreno: 7%)

3.2.6.1. Descripción general del perfil

Suelo muy profundo, formado por la acumulación progresiva de material fino proveniente de la vertiente superior. El perfil está constituido por: un horizonte Ap de 18 cm de espesor, pardo oscuro, arcillo-limoso al tacto; un horizonte Bt1 de 13 cm de espesor, pardo grisáceo oscuro, con 40% de manchas de óxido - reducción, pequeñas de color rojo, arcilloso al tacto, con bloques angulares grandes de fuerte desarrollo; un horizonte Bt2 de 24 cm de espesor, pardo, arcillo limoso al tacto, con bloques subangulares medios de moderado desarrollo en los cuales se evidencia inmigración de arcilla; un horizonte de transición BC de 25 cm de espesor, pardo, arcillo limoso; y, un horizonte C de más de 40 cm de espesor, pardo, franco limoso al tacto, masivo. Las raíces finas

y muy pocas se extienden hasta 80 cm. Sin presencia de carbonatos. El drenaje es moderado (Figura 10).



Figura 10. Perfil P6Z

3.2.6.2. Características físico - químicas

Los análisis de laboratorio (Cuadro 9) evidencian que todos los horizontes del perfil son de textura pesada (arcillosa). El pH es fuertemente ácido (5,2 - 5,5) excepto en los horizontes Bt1 y Bt2 que son medianamente ácidos (5,6 - 6,0). La acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) es media en los dos primeros horizontes [$0,8 - 1,45 \text{ meq (100g)}^{-1}$], pero se incrementa bruscamente a un nivel muy alto (tóxico) en los dos horizontes inferiores [$7,46 - 25,43 \text{ meq (100g)}^{-1}$]. El contenido de materia orgánica disminuye progresivamente con la profundidad desde 3,24% (medio) en el horizonte Ap hasta 1,39 % (bajo) en el horizonte C.

Cuadro 9. Textura, pH, acidez cambiante y materia orgánica del perfil P6Z

Horizonte	Profundidad cm	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase	pH _(H2O)	H ⁺ + Al ³⁺	MO
					Textural		meq (100g) ⁻¹	%
Ap	00 - 18	24	28	48	Ac	5,4	1,45	3,24
Bt1	18 - 31	22	30	48	Ac	5,9	0,80	2,72
Bt2	31 - 55	20	28	52	Ac	5,6	2,41	,43
BC	55 - 80	30	26	44	Ac	5,5	7,46	2,20
C	80 - 120+	30	18	52	Ac	5,2	25,43	1,39

3.2.7. Efecto del uso del suelo y la pendiente del terreno sobre las características físico -químicas del horizonte Ap

El denominado horizonte Ap corresponde a la capa superior de suelo, que generalmente es de color más oscuro que el resto de horizontes del perfil debido al continuo aporte de materia orgánica por parte de la vegetación. El sufijo “p” es la letra inicial de la palabra inglesa plow que significa labrar; en otras palabras, que ha sido intervenido por el hombre ya sea para su uso en cultivos o pastizales. Es el horizonte de mayor actividad biológica del suelo y el más dinámico en cuanto a la fertilidad y las características hidrodinámicas (Schaetzl y Anderson, 2009).

El espesor del Ap en los seis perfiles estudiados (Cuadro 10) oscila entre 6 cm (P3Z y P4Z) y 18 cm (P6Z). Únicamente para los perfiles P1Z y P2Z ubicados en el rango de pendiente de 20 a 28%, es notable una importante diferencia del espesor del Ap (15 y 5 cm, respectivamente) en relación al uso del suelo, correspondiendo el menor espesor al uso con hortalizas, lo cual es atribuible a una mayor erosión debido a que la labranza ha promovido la remoción del suelo, y a la menor cobertura en relación al pasto. En los perfiles P3Z y P4Z, el espesor del Ap es únicamente de 6 cm lo cual se atribuye a procesos erosivos anteriores.

En cuatro de los seis perfiles estudiados, la textura del Ap es pesada (arcilla > 40%); en tanto que, en los perfiles P4Z y P5Z es media. La textura arcillosa del Ap se atribuye a que el horizonte A inicial del suelo ha sido erosionado y se ha aproximado a la superficie el horizonte Bt de acumulación de arcilla eluvial. No se detecta relación entre el uso del terreno y la textura, lo cual es explicable por cuanto ésta es una de las características físicas más estables del suelo (Schaetzl y Anderson, 2009).

El uso del terreno evidencia marcada influencia sobre el contenido de materia orgánica del horizonte Ap; así, para el uso con pastos los valores se ubican en los rangos alto y muy alto, mientras que al uso con hortalizas le corresponde el rango medio. Ello se atribuye a que la labranza produce una mayor oxigenación del suelo lo que conlleva a una más alta tasa de mineralización de la materia orgánica; en cambio, en los terrenos con pastos la densidad aparente es mayor y la capacidad de aireación es muy baja (parámetros que se explican más adelante) por lo que se generan condiciones de reducción y la descomposición

de la materia orgánica es más lenta. También, en el caso de los pastos, a menor inclinación del terreno es mayor el contenido de materia orgánica (P4Z y P5Z).

La acidez cambiante se ubica en los rangos bajo y medio [0,26 - 1,45 meq (100g)⁻¹] excepto en el perfil P5Z que es muy alta [8,05 meq (100g)⁻¹] lo que evidencia condiciones de toxicidad de Al³⁺ en la capa arable del suelo. Sin embargo, en relación al uso del suelo, no se detecta una tendencia definida sobre este parámetro.

Cuadro 10. Características físico - químicas del horizonte Ap de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago

Perfil	Uso del suelo	Pendiente %	Espesor Ap	Arcilla %	Clase Textural	pH _(H₂O)	H ⁺ + Al ³⁺ meq (100g) ⁻¹	MO %
P1Z	Pasto	28	15	44	Ac	6,1	0,62	4,7
P2Z	Hortalizas	20	5	42	Ac	6,7	0,26	3,0
P3Z	Hortalizas	12	6	42	Ac	5,7	0,64	3,3
P4Z	Pasto	14	6	34	FoAc	6,1	0,45	7,7
P5Z	Pasto	3	8	26	Fo	5,3	8,05	8,1
P6Z	Hortalizas	7	18	48	Ac	5,1	1,45	3,2

3.3. Comportamiento hidrodinámico de los suelos

3.3.1. Retención de humedad del suelo y condiciones físicas para el crecimiento de las plantas

En el Cuadro 11 para los dos primeros horizontes de cada uno de los seis perfiles de los suelos estudiados, se presentan los resultados de los contenidos de humedad en unidades de volumen (%θ_v) para pF 0 (saturación o porosidad total); pF 2,0 - pF 2,52 (capacidad de campo); pF 2,9 (máximo rango del tensiómetro); y, pF 4,2 (punto de marchitez permanente), los cuales fueron obtenidos en el Laboratorio de Suelos del Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables (AARNR) de la Universidad Nacional de Loja (UNL), a partir de muestras inalteradas tomadas por duplicado con cilindros Kopecky de 100 cm³. Con estos valores se graficaron las curvas características de humedad del suelo (Figuras 11 y 12).

En base a los resultados del Cuadro 11, se han derivado los siguientes parámetros: capacidad de aireación (CA), agua aprovechable (AA); y, volumen de suelo

físicamente inerte (VFI); los cuales, fueron ubicados en el diagrama triangular (Anexo 2) para categorizar la condición física del suelo para el crecimiento de las plantas, que se presenta en el Cuadro 12.

Las Figuras 11 y 12 revelan que el primer y segundo horizonte de los suelos de uso con hortalizas retienen mayores contenidos de agua a saturación (pF 0,0), capacidad de campo (pF 2,0 o 2,52) y pF 3,0 (límite superior de operación del tensiómetro), que los suelos de uso con pasto.

3.3.1.1. Perfil P1Z (uso: pasto; pendiente del terreno: 28%)

3.3.1.1.1. Condición física de la capa 00 - 15 cm

En la capa de 00 - 15 cm (horizonte Ap) la densidad aparente es de $1,41 \text{ g cm}^{-3}$, valor que supera al rango común para los suelos de textura arcillosa, lo que evidencia compactación de esta capa. El volumen total de poros a pF 0 es de $31,6\% \theta_v$, valor que es muy bajo. La retención de agua a pF 4,2 es de $17,0\% \theta_v$ lo que indica que más de la mitad del volumen de poros del suelo son microporos, los cuales retienen agua que no puede ser tomada por las plantas.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo a capacidad de campo cuando a ésta se la considera equivalente a la retención de agua a pF 2,0 señala que la capacidad de aireación ($2,6\% \theta_v$) se encuentran en el rango muy bajo, el agua aprovechable ($12,0\% \theta_v$) en el rango medio y el volumen del suelo físicamente inerte es muy alto ($85,4\% \theta_v$); a consecuencia de ello, la condición física de ésta capa para el crecimiento de las plantas se ubica en la zona I del diagrama triangular, equivalente a muy pobre, lo que refleja degradación de la estructura y disminución de la macroporosidad del suelo, atribuible al sobre pisoteo del ganado.

Para la retención de agua a pF 2,52 (capacidad de campo según el USDA) la capacidad de aireación ($3,6\% \theta_v$) y el agua aprovechable ($11,0\% \theta_v$) se encuentran en el rango muy bajo y medio, respectivamente.

3.3.1.1.2. Condición física de la capa 15 - 35 cm

En la capa de 15 - 35 cm (horizonte AC) la densidad aparente es de $1,39 \text{ g cm}^{-3}$, valor que es mayor al rango común para los suelos de textura arcillosa, lo que indica que el efecto de compactación por el pisoteo del ganado afecta también a esta capa.

El volumen total de poros es de 39,0% θ_v , calificado como bajo. La retención de agua a pF 4,2 es de 16,0% θ_v valor que indica que más de un tercio de la porosidad total del suelo corresponde a microporos (poros inútiles) que retienen agua que no es aprovechable por las plantas.

Cuadro 11. Retención de humedad en el rango de pF 0,0 a pF 4,2 de los dos primeros horizontes de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago

Perfil / Uso / Pendiente	Profundidad cm	Da g cm ⁻³	Porosidad	Capacidad	Capacidad	Max. Rango	Punto
			Total % θ_v pF 0	Campo % θ_v pF 2	Campo % θ_v pF 2,52	Tensióm. % θ_v pF 2,9	Marchitez % θ_v pF 4,2
P1Z pasto 28%	00 - 15 cm	1,41	31,6	29,0	28,0	26,0	17,0
	15 - 35 cm	1,39	39,0	38,0	37,0	36,0	16,0
P2Z hortalizas 20%	00 - 05 cm	1,30	57,0	52,0	51,0	50,0	18,0
	05 - 30 cm	1,33	58,0	53,0	52,0	51,0	14,0
P3Z hortalizas 12%	00 - 06 cm	1,29	49,8	42,0	40,0	39,0	16,0
	06 - 16 cm	1,31	55,0	51,0	50,0	49,0	14,0
P4Z pasto 14%	00 - 06 cm	1,37	30,0	29,0	28,0	27,0	16,0
	06 - 22 cm	1,26	43,0	41,0	40,0	38,0	14,0
P5Z pasto 3%	00 - 08 cm	1,33	23,0	19,0	17,0	15,0	14,0
	08 - 15 cm	1,26	39,0	37,0	36,0	35,0	16,0
P6Z hortalizas 7%	00 - 18 cm	1,06	59,4	49,0	46,0	45,0	16,0
	18 - 31 cm	1,20	52,4	41,0	39,0	38,0	15,0

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0 evidencia que la capacidad de aireación (1,0% θ_v) se encuentra en el rango muy bajo, el agua aprovechable (22,0% θ_v) es muy alta y el volumen del suelo físicamente inerte es alto (77,0% θ_v); consecuentemente, debido a la muy limitada capacidad de aireación, la condición física de esta capa para el crecimiento de las plantas se ubica en la zona I del diagrama triangular, que corresponde a muy pobre. Por la menor capacidad de aireación este horizonte sería más compacto que el horizonte Ap.

Para la retención de agua a pF 2,52 la capacidad de aireación ($2,0\%\theta_v$) y el agua aprovechable ($21,0\%\theta_v$) se encuentran en el rango muy bajo y alto respectivamente.

3.3.1.2. Perfil P2Z (uso: hortaliza; pendiente del terreno: 20%)

3.3.1.2.1. Condición física de la capa 00 - 05 cm

En la capa de 00 - 05 cm (horizonte Ap), la densidad aparente es de $1,3 \text{ g cm}^{-3}$, valor que excede al rango común para los suelos de textura arcillosa. El volumen total de poros es de $57,0\%\theta_v$, que se lo considera adecuado. La retención de agua a pF 4,2 es de $18,0\%\theta_v$, valor que indica que casi un tercio del volumen de poros del suelo son microporos.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0, indica que la capacidad de aireación ($5,0\%\theta_v$) se encuentra en el límite entre el rango bajo y muy bajo, el agua aprovechable ($34,0\%\theta_v$) se ubica en el rango muy alto, y el volumen del suelo físicamente inerte en el bajo ($61,0\%\theta_v$). Debido a la baja capacidad de aireación, la condición física de esta capa para el crecimiento de las plantas se ubica en la zona II del diagrama triangular, equivalente a pobre.

Para la retención de agua a pF 2,52 la capacidad de aireación ($6,0\%\theta_v$) se encuentra en el rango bajo; en tanto que, el agua aprovechable ($33,0\%\theta_v$) se ubica en el rango muy alto.

3.3.1.2.2. Condición física de la capa 05 - 30 cm

En la capa de 05 - 30 cm (horizonte Bth), la densidad aparente es de $1,33 \text{ g cm}^{-3}$ valor que excede al rango común para los suelos de textura arcillosa. El volumen total de poros es de $58,0\%\theta_v$, que se lo considera adecuado. La retención de agua a pF 4,2 es de $14,0\%\theta_v$, valor que indica que alrededor de casi un cuarto del volumen de poros del suelo está constituido por poros muy pequeños que retienen agua que no es aprovechable por las plantas.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0 revela que la capacidad de aireación ($5,0\%\theta_v$), se encuentra en el límite entre el rango muy bajo y bajo; mientras que, el agua aprovechable ($39,3\%\theta_v$) se ubica en el rango muy alto. El volumen del suelo físicamente inerte es moderado ($56,0\%\theta_v$), por lo que, la condición física de esta capa para

el crecimiento de las plantas corresponde a la zona II del diagrama triangular, equivalente a pobre.

Para la retención de agua a pF 2,52 la capacidad de aireación (6,0% θ_v) se encuentra en el rango bajo y el agua aprovechable (38,0% θ_v) en el rango muy alto.

3.3.1.3. Perfil P3Z (uso: hortalizas, pendiente del terreno: 12%)

3.3.1.3.1. Condición física de la capa 00 - 06 cm

En la capa de 00 - 06 cm (horizonte Ap) la densidad aparente es de 1,29 g cm⁻³, valor que se encuentra dentro del rango común para los suelos de textura arcillosa. El volumen total de poros es de 49,8% θ_v , que se lo considera aceptable. La retención de agua a pF 4,2 es de 16,0% θ_v , lo que indica que alrededor de un tercio de la porosidad total del suelo corresponde a poros muy pequeños que retienen agua que no es aprovechable por las plantas.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0 evidencia que la capacidad de aireación (7,8% θ_v) se encuentra en el rango bajo, mientras que el agua aprovechable (26,0% θ_v) se ubica en el rango muy alto. El volumen del suelo físicamente inerte es aceptable (62,0% θ_v); sin embargo, debido a la baja capacidad de aireación, la condición física de esta capa para el crecimiento de las plantas corresponde a la zona II del diagrama triangular, equivalente a pobre.

Para la retención de agua a pF 2,52 la capacidad de aireación (9,8% θ_v) y el agua aprovechable (24,0% θ_v) se ubican en el rango de bajo y muy alto respectivamente.

Cuadro 12. Capacidad de aireación, agua aprovechable, volumen físicamente inerte y zona del diagrama triangular, de los dos primeros horizontes de los seis perfiles, para diferentes usos de suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago

Perfil/ Uso/ Pendiente	Profundidad cm	Capacidad Aireación		Capacidad Aireación		Agua Aprovechable		Agua Aprovechable		Volumen de suelo físicamente inerte		Zona del diagrama		Equivalencia
		%θv pF 2,0	%θv pF 2,52	%θv pF 2,0	%θv pF 2,52	%θv pF 2,0	%θv pF 2,52	%θv	%θv	pF 2,0	pF 2,52	pF 2,0	pF 2,52	
P1Z pasto 28%	00 - 15 cm	2,6	3,6	12,0	11,0	11,0	85,4						I	Muy Pobre
	15 - 35 cm	1,0	2,0	22,0	21,0	21,0	77,0						I	Muy Pobre
P2Z hortalizas 20%	00 - 05 cm	5,0	6,0	34,0	33,0	33,0	61,0						II	Pobre
	05 - 30 cm	5,0	6,0	39,0	38,0	38,0	56,0						II	Pobre
P3Z hortalizas 12%	00 - 06 cm	7,8	9,8	26,0	24,0	24,0	66,2						II	Pobre
	06 - 16 cm	4,0	5,0	37,0	36,0	36,0	59,0						I	Muy Pobre
P4Z pasto 14%	00 - 06 cm	1,0	2,0	13,0	12,0	12,0	86,0						I	Muy Pobre
	06 - 22 cm	2,0	3,0	27,0	26,0	26,0	71,0						I	Muy Pobre
P5Z pasto 3%	00 - 08 cm	4,0	6,0	5,0	3,0	3,0	91,0						I	Muy Pobre
	08 - 15 cm	2,0	3,0	21,0	20,0	20,0	77,0						I	Muy Pobre
P6Z hortalizas 7%	00 - 18 cm	10,4	13,4	33,0	30,0	30,0	56,6						III	Medio
	18 - 31 cm	11,4	13,4	26,0	24,0	24,0	62,6						III	Medio

3.3.1.3.2. Condición física de la capa 06 - 16 cm

En la capa de 06 - 16 cm (horizonte Bt) la densidad aparente es de $1,31 \text{ g cm}^{-3}$, valor que se encuentra dentro del rango común para los suelos de textura franco arcillosa. El volumen total de poros es de $55,0\% \theta_v$, que se lo considera aceptable. La retención de agua a pF 4,2 es de $14,0\% \theta_v$, valor que enseña que alrededor de un cuarto de la porosidad del suelo corresponde a microporos, o poros inútiles.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0 indica que la capacidad de aireación ($4,0\% \theta_v$) se encuentra en el rango muy bajo; mientras que, el agua aprovechable ($37,0\% \theta_v$) se ubica en el rango muy alto. Aunque el volumen físicamente inerte del suelo es un tanto aceptable ($59,0\% \theta_v$), debido a la baja capacidad de aireación, la condición física de esta capa para el crecimiento de las plantas corresponde a la zona I del diagrama triangular, equivalente a muy pobre.

Para la retención de agua a pF 2,52 la capacidad de aireación ($5,0\% \theta_v$) se encuentra en el rango muy bajo y el agua aprovechable ($36,0\% \theta_v$) se ubica en el rango muy alto.

3.3.1.4. Perfil P4Z (uso: pastos, pendiente del terreno: 14%)

3.3.1.4.1. Condición física de la capa 00 - 06 cm

En la capa de 00 - 06 cm (horizonte Ap) la densidad aparente es de $1,37 \text{ g cm}^{-3}$, valor que se encuentra dentro del rango común para los suelos de textura franco arcillosa, lo cual se atribuye al efecto del muy alto contenido de materia orgánica ($7,7\%$). El volumen total de poros es de $30,0\% \theta_v$, valor que se considera bajo y que se atribuye al pisoteo del ganado. La retención de agua a pF 4,2 es de $16\% \theta_v$, valor que revela que alrededor de la mitad de la porosidad total del suelo está constituido por poros muy pequeños (inútiles) que retienen agua que no es aprovechable por las plantas.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0 revela que la capacidad de aireación ($1,0\% \theta_v$) se encuentra en el extremo inferior del rango muy bajo; mientras que al agua aprovechable ($13,0\% \theta_v$) le corresponde el rango medio. El volumen del suelo físicamente inerte es muy alto ($86,0\% \theta_v$). Debido a la muy baja capacidad de aireación, la condición física de esta capa para el crecimiento de las plantas se ubica en la zona I del diagrama triangular, equivalente a muy pobre.

En el caso de la retención de agua a pF 2,52 la capacidad de aireación (2,0% θ_v) corresponde al rango muy bajo, en tanto que el agua aprovechable (12,0% θ_v) pertenece al rango medio.

3.3.1.4.2. Condición física de la capa 06 - 22 cm

En la capa de 06 - 22 cm (horizonte AE) la densidad aparente es de 1,26 g cm⁻³, valor que está influenciado tanto por su textura arcillosa, como por el alto contenido de materia orgánica (4,7%). El volumen total de poros es de 43,0% θ_v , valor que se lo considera bajo. La retención de agua a pF 4,2 es de 16,0% θ_v valor que indica que más de un tercio del volumen de la porosidad total del suelo, está constituido por poros muy pequeños que retienen agua que no es aprovechable por las plantas.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0 revela que la capacidad de aireación (2,0% θ_v) se encuentra en el extremo inferior del rango muy bajo; mientras que, el agua aprovechable (27,0% θ_v) se ubica en el rango muy alto, debido a la textura arcillosa. El volumen del suelo físicamente inerte es aceptable (71,0% θ_v); no obstante, debido a la muy baja capacidad de aireación, la condición física de esta capa para el crecimiento de las plantas se ubica en la zona I del diagrama triangular, equivalente a muy pobre.

En cuanto a la retención de agua a pF 2,52, la capacidad de aireación (3,0% θ_v) también se ubica en el rango muy bajo; en tanto que, el agua aprovechable (22,6% θ_v) pertenece al rango muy alto.

3.3.1.5. Perfil P5Z (uso: pasto, pendiente del terreno: 3%)

3.3.1.5.1. Condición física de la capa 00 - 08 cm

En la capa de 00 - 08 cm (horizonte Ap) la densidad aparente es de 1,33 g cm⁻³, valor que se encuentra por debajo del rango común para suelos de textura franca, lo cual se atribuye al muy alto contenido de materia orgánica (8,8%). El volumen total de poros es de 23,0% θ_v , valor que se lo califica como muy bajo, a consecuencia del sobre pisoteo del suelo por el ganado bovino. La retención de agua a pF 4,2 es de 14,0% θ_v por lo que más de la mitad de la porosidad total del suelo corresponde a microporos (poros inútiles) que no proveen aire ni agua a las raíces de las plantas.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0 indica que la capacidad de aireación ($4,0\%\theta_v$) se encuentra en el rango muy bajo; mientras el agua aprovechable ($5,0\%\theta_v$) se ubica en el límite entre los rangos muy bajo y bajo. El volumen del suelo físicamente inerte es muy alto ($91,0\%\theta_v$). Debido a la muy baja capacidad de aireación y el bajo nivel de agua aprovechable, la condición física de esta capa pertenece a la zona I del diagrama triangular, equivalente a muy pobre.

En cuanto a la retención de agua a pF 2,52 la capacidad de aireación ($6,0\%\theta_v$) y el agua aprovechable ($3,0\%\theta_v$) se ubican en el rango muy bajo.

3.3.1.5.2. Condición física de la capa 08 - 15 cm

En la capa de 08 - 15 cm (horizonte AB) la densidad aparente es de $1,26 \text{ g cm}^{-3}$, valor que está dentro del rango común para la textura arcillosa. El volumen total de poros es de $39,0\%\theta_v$, al cual se lo califica como muy bajo. La retención de agua a pF 4,2 es de $16,0\%\theta_v$, valor que evidencia que ligeramente más de la mitad de la porosidad total del suelo está constituida por poros muy pequeños que no proveen de aire ni de agua a las raíces.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0 revela que la capacidad de aireación ($2,0\%\theta_v$) se encuentra en el rango muy bajo, mientras que el agua aprovechable ($21,0\%\theta_v$) pertenece al rango muy alto, por efecto de la textura arcillosa. El volumen del suelo físicamente inerte es moderado ($77,0\%\theta_v$). Debido a la muy baja capacidad de aireación, la condición física de esta capa para el crecimiento de las plantas se ubica en la zona I del diagrama triangular, equivalente a muy pobre.

En relación a la retención de agua a pF 2,52 a la capacidad de aireación ($3,0\%\theta_v$) le corresponde el rango muy bajo; y, al agua aprovechable ($21,0\%\theta_v$) el rango muy alto.

3.3.1.6. Perfil P6Z (uso: hortalizas, pendiente: 7%)

3.3.1.6.1. Condición física de la capa 00 - 18 cm

En la capa de 00 - 18 cm (horizonte Ap) la densidad aparente es de $1,06 \text{ g cm}^{-3}$, valor que es menor al rango común para suelos arcillosos, lo cual se atribuye al efecto de la materia orgánica y las labores de labranza para el cultivo de las hortalizas que han expandido el suelo. El volumen total de poros es de $59,4\%\theta_v$,

que corresponde a una porosidad total alta. La retención de agua a pF 4,2 es de 16,0% θ_v , valor que evidencia que menos de un tercio de la porosidad del suelo está constituida por microporos que no proveen de aire ni de agua a las raíces.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0 indica que la capacidad de aireación (10,4% θ_v) se encuentra en el límite entre los rangos bajo y medio; mientras al agua aprovechable (33,0% θ_v) se ubica en el rango muy alto. El volumen del suelo físicamente inerte es moderado (56,6% θ_v). La condición física de esta capa para el crecimiento de las plantas se ubica en la zona III del diagrama triangular, equivalente a media.

En cuanto a la retención de agua a pF 2,52 a la capacidad de aireación (13,4% θ_v) le corresponde el rango medio y al agua aprovechable (30,0% θ_v) el rango muy alto.

3.3.1.6.2. Condición física de la capa 18 - 31 cm

En la capa de 18 - 31 cm (horizonte Bt1) la densidad aparente es de 1,2 g cm⁻³, valor que se encuentra dentro del rango común para la textura arcillosa. El volumen total de poros es de 52,4% θ_v , el cual se lo califica como medio. La retención de agua a pF 2,0 es de 15,0% θ_v , valor que evidencia que más de un cuarto del volumen de poros del suelo está constituido por poros muy pequeños que no proveen de aire ni de agua a las raíces.

La distribución de los volúmenes de las fases del suelo para la retención de agua a pF 2,0 indica que la capacidad de aireación (11,4% θ_v) se encuentra en el rango medio, mientras que el agua aprovechable (26,0% θ_v) le corresponde un rango muy alto. El volumen del suelo físicamente inerte es moderado (62,6% θ_v). La condición física de esta capa para el crecimiento de las plantas se ubica en la zona III del diagrama triangular, equivalente a medio.

En relación a la retención de agua a pF 2,52 a la capacidad de aireación (13,4% θ_v) y al agua aprovechable (26,0% θ_v) les corresponde los rangos de medio y muy alto, en su orden.

3.3.1.7. Efecto del uso del suelo y la pendiente del terreno sobre la condición física de la zona radicular del suelo

En el uso con pasto, la condición física de la zona radicular (dos primeros horizontes) de los tres perfiles estudiados se ubica en la zona I del Diagrama

Triangular, equivalente a muy pobre. La situación es menos grave en el uso con hortalizas, dos de cuyos perfiles (P2Z y P3Z) pertenecen a la zona II (pobre) y el perfil P6Z a la zona III (medio).

A continuación se discute el efecto de la capacidad de aireación y el agua aprovechable sobre las condiciones físicas de la zona radicular de los suelos estudiados.

3.3.1.7.1. Capacidad de Aireación

Las pruebas de rangos múltiples de Tukey para el nivel de significancia del 5% para el factor uso del suelo, evidenció que la capacidad de aireación en el uso con hortalizas para el primer horizonte ($8,8\% \theta_v$) es estadísticamente diferente al uso con pasto ($3,7\% \theta_v$). De igual manera, para el segundo horizonte, estadísticamente tuvo el mismo comportamiento ($7,0\% \theta_v$) para el uso con hortalizas frente al uso con pastos ($3,1\% \theta_v$).

En los dos tipos de uso del suelo, la capacidad de aireación constituye un factor físico limitante para el crecimiento de las plantas. Éste es más grave en el uso con pastos, como resultado de la compactación del suelo por el sobrepastoreo del ganado bovino. Una tendencia similar ha sido encontrada por Flores *et al.*, (2011) en la subcuenca “Callecitas”, estado Guárico, Venezuela, en donde los usos de huerta y hortalizas presentaron los valores más altos de capacidad de aireación ($21,8\% \theta_v$ y $21,3\% \theta_v$ respectivamente); mientras que, el uso con pasto ($11,9\% \theta_v$) tuvo los valores más bajos. También, Fernández *et al.*, (2006) reportan una disminución del 66,0% de la capacidad de aireación por efecto del pastoreo de cabras en la IV Región de Chile. Finalmente, Quichimbo *et al.*, (2012) indican que la transición de pajonal a cultivo de papas o la quema de pajonal, disminuyeron la capacidad de aireación en el páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador.

Al respecto, es preciso señalar que la disminución de la capacidad de aireación por efecto de la compactación disminuye la oxigenación del suelo por destrucción de los macroporos, y la reducción en número y tamaño de los poros, lo que no permite la circulación del oxígeno, limitando con ello la producción (Duiker, 2005).

Los resultados de las condiciones físicas de los suelos del uso con pastos son coincidentes con aquellos reportados por Valarezo (1997) para la Serie

Santiago del Sistema de Riego Santiago, en un terreno cubierto de pasto a una altitud de 2 280 m s. n. m. y de 60% de pendiente, habiendo encontrado que en el horizonte Ap para la retención del agua a pF 2,0 la capacidad de aireación fue muy baja (3,9% θ_v); mientras que, el valor del agua aprovechable fue alta (15,2% θ_v), ubicándose en la zona muy pobre la condición física del suelo para el crecimiento de las plantas.

La baja capacidad de aireación de los suelos con hortalizas (P2z y P3Z) estaría relacionada a dos factores, por un lado la textura arcillosa predominante; y, por otro, el laboreo del terreno. Al respecto, Bernal *et al.*, (2003) encontraron que la capacidad de aireación disminuyó con el laboreo en un suelo franco limoso con rotación papa - pastos en áreas de ladera en una región alto andina de Colombia. En la misma línea Sasal *et al.*, (2009) indican que la capacidad de aireación fue menor en el uso del suelo con soya (2% θ_v) frente al uso con pradera (10% θ_v); y, Daza *et al.*, (2014) que reportan que la capacidad de aireación (macroporosidad) se redujo en 29,8% θ_v para el suelo con cultivo de papa y 10% θ_v para el suelo con pasto, en el área del Parque Natural del Sumapaz, Colombia.

3.3.1.7.2. Agua aprovechable

Primer horizonte

La prueba de rangos múltiples de Tukey para el factor uso del suelo, indicó que el promedio del agua aprovechable en el uso con hortalizas (29,1% θ_v) difiere estadísticamente al nivel del 5% frente al uso con pastos (9,1% θ_v), éste resultado no se podría atribuir a un efecto del uso del suelo en sí. La explicación estaría dada por la textura. En la situación del uso con hortalizas, la textura de la capa superior es arcillosa; en tanto que, en los suelos con pastos la textura es franca a franco arcillosa. Consecuentemente, al ser más fina la textura, la retención de agua es mayor. Además, en los suelos estudiados del área de Salapa se ha observado fisuras en periodos de estiaje, por lo que se considera que hay cierto predominio de arcillas del grupo de las esmectitas, las cuales tienen una elevada capacidad de retención de agua.

En todo caso, ilustrativamente se considera pertinente mencionar el efecto del uso del suelo sobre la retención de agua que reportan varios investigadores; así, Buytaer *et al.*, (2005) en un Andosol úmbrico de la cuenca del Paute, en los Andes del Ecuador, encontraron que la retención de agua disminuyó en los suelos con cultivos, frente al uso con vegetación arbustiva original.

También, indican que el contenido medio de agua total disponible en suelos del páramo del Azuay (Ecuador) fue un poco mayor en el suelo cultivado con papa en comparación con las pasturas; sin embargo, las diferencias fueron muy pequeñas y no significativas. Finalmente, Valle *et al.*, (2011) en un suelo aluvial, de textura franco arcillo arenosa de la Estación Experimental Antumapu de la Universidad de Chile, encontraron que el contenido de agua aprovechable (AA) fue mayor para labranza cero frente a la labranza tradicional, lo cual es muy beneficioso, ya que el efecto que tenga un retraso en el riego o lluvia será algo menor para el primer caso; además, sostienen que la retención de agua del suelo está definida por la calidad estructural del suelo.

Por otro lado, la prueba de rangos múltiples de Tukey para el factor pendiente del terreno evidenció que el promedio del agua aprovechable para la pendiente del terreno $>16\%$ ($22,8\% \theta_v$), es estadísticamente diferente a los rangos de pendiente de $8 - 16\%$ y $0 - 8\%$, los cuales son estadísticamente iguales, con valores de $17,5\% \theta_v$ y $17,0\% \theta_v$ respectivamente, resultados que se podría atribuir a la mayor erosión asociada al aumento de la pendiente con el concomitante acercamiento a la superficie del horizonte Bt de acumulación de arcilla iluvial, el cual es de textura fina (pesada) y denso. No obstante, estos resultados difieren con aquellos encontrados por Asmamaw y Mohammed (2012) en un suelo de la cuenca Gerado al Nororiente de Etiopía, en donde el mayor contenido de agua aprovechable correspondió a la menor pendiente, a consecuencia de la eliminación selectiva de las partículas de arcilla de la parte más empinada de la pendiente y su acumulación en las áreas más planas.

Segundo horizonte

La prueba de rangos múltiples de Tukey para el factor uso del suelo determinó que el promedio del agua aprovechable del suelo con uso de hortalizas ($33,4\% \theta_v$) difiere estadísticamente al nivel del 5% frente al uso con pastos ($22,2\% \theta_v$), resultados que les correspondería una explicación similar que aquella que se dio para el primer horizonte, en el sentido de que antes que el uso mismo del suelo, es la textura del horizonte la que determina la diferencia significativa detectada. Al respecto, Ceballos *et al.*, (2005) en suelos del sector semiárido de la cuenca del Duero en España, detectaron que la fracción textural es la principal variable que tiene influencia directa sobre la capacidad de retención hídrica de los suelos y su distribución a lo largo del perfil.

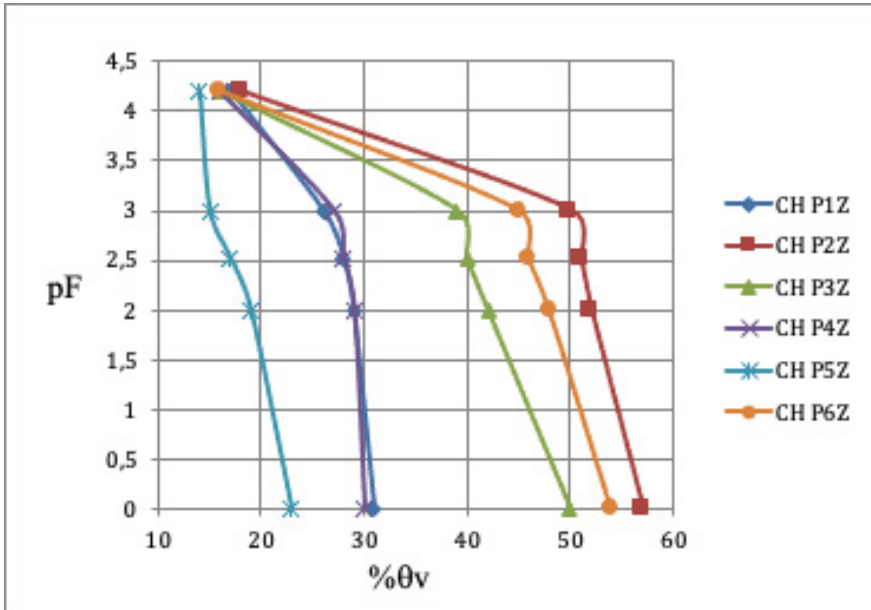


Figura 11. Curvas de retención de humedad del primer horizonte de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago

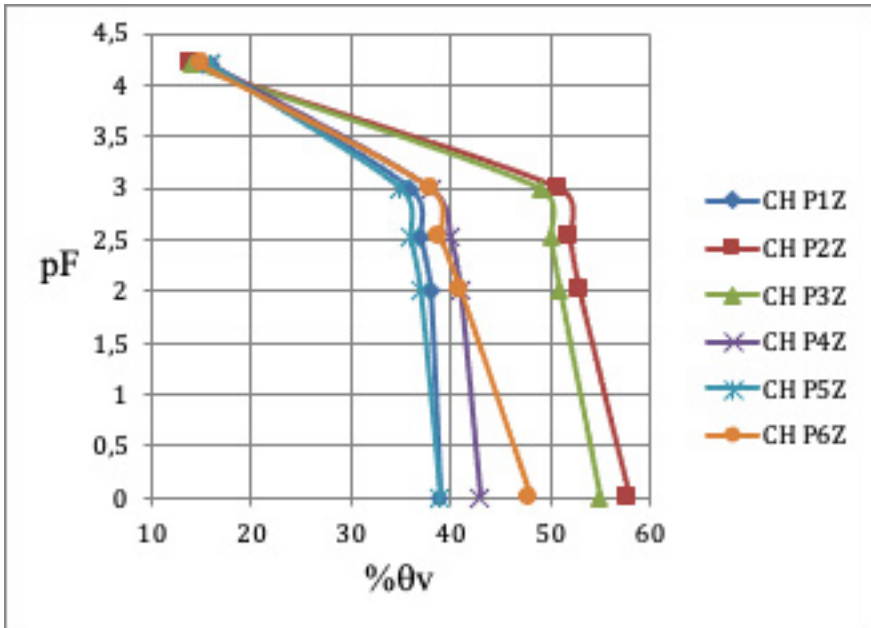


Figura 12. Curvas de retención de humedad del segundo horizonte de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago

3.3.2. Conductividad hidráulica

3.3.2.1. Conductividad hidráulica de los horizontes superiores (método del permeámetro de carga constante)

Los valores promedio de conductividad hidráulica saturada (K_s) de los dos horizontes superiores de los seis perfiles representativos de la combinación uso del suelo y pendiente del terreno del área de riego de Salapa (Cuadro13), que se determinaron por duplicado en el laboratorio de suelos del Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja, mediante el método del permeámetro de carga constante, en muestras inalteradas contenidas en cilindros Kopecky, oscilan entre $0,01 \text{ m d}^{-1}$ (muy lenta) a $0,12 \text{ m d}^{-1}$ (moderadamente lenta), los cuales guardan cierta correspondencia con la textura del suelo.

Es preciso enfatizar que al uso del suelo con pastos le corresponden los valores más bajos, lo cual nuevamente se explicaría por la disminución de la porosidad del suelo debido a la compactación causada por el recurrente pisoteo del ganado. Ello coincide con los resultados encontrados por Martínez *et al.*, (2010) en suelos de la localidad de Marcos Paz, provincia de Buenos Aires, para diferentes intensidades de carga animal; en los cuales, la disminución de la K_s (determinada por el método del permeámetro de carga constante) es atribuida al efecto de pisoteo animal y a la pérdida de la estructura del suelo por amasado. En la misma línea, Soracco (2003) encontró que la menor K_s correspondió al terreno transitado por animales ($1,1 \text{ m d}^{-1}$) frente al uso hortícola ($2,2 \text{ m d}^{-1}$). También, Buytaert *et al.*, (2005) reportan diferencia significativa en los valores de K_s , siendo menor en las pasturas y mayor en el uso del suelo con papa.

En cambio, Ramírez *et al.*, (2010) encontraron diferencias en la conductividad hidráulica saturada determinada por el método del permeámetro de carga constante, entre suelos de terreno virgen y con 10 años de barbecho frente a suelos con 5, 10 y 20 años de labranza, en un Andisol de Antioquia, Colombia.

Por su parte, Quichimbo *et al.*, (2012) para diferentes usos del suelo en el páramo de Quimsacocha al Sur del Ecuador, encontraron que la conductividad hidráulica saturada fue mayor para la cobertura con pasto y bosque de pino, frente al cultivo de papa y pajonal quemado.

Cuadro 13. Conductividad hidráulica saturada (Ks) de los dos primeros horizontes de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rango de pendiente del terreno, determinada por el método del permeámetro de carga constante en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago

Perfil	Uso del suelo	Pendiente %	Horizonte	Profundidad cm	Repetición 1	Repetición 2	Promedio	Equivalencia
					m día ⁻¹	m día ⁻¹	m día ⁻¹	
P1Z	Pasto	28	Ap	00 – 15	0,01	0,04	0,02	Muy lenta
			AE	15 – 35	0,06	0,00	0,03	Muy lenta
P2Z	Hortalizas	20	Ap	00 – 05	0,12	0,00	0,06	Lenta
			Bth	05 – 30	0,12	0,10	0,11	Lenta
P3Z	Hortalizas	12	Ap	00 – 06	0,01	0,09	0,05	Lenta
			Bt	06 – 16	0,12	0,01	0,06	Lenta
P4Z	Pasto	14	Ap	00 – 06	0,23	0,01	0,12	Mod Lenta
			AE	06- 22	0,01	0,02	0,01	Muy Lenta
P5Z	Pasto	3	Ap	00 – 08	0,02	0,15	0,09	Lenta
			AB	08 – 15	0,23	0,01	0,12	Lenta
P6Z	Hortalizas	7	Ap	00 – 18	0,00	0,36	0,18	Mod. Lenta
				18 – 31	0,01	0,01	0,01	Muy Lenta

3.3.2.2. Conductividad hidráulica del tercer horizonte (método del hoyo barrenado invertido)

Los valores promedio de la conductividad hidráulica saturada del tercer horizonte de cada uno de los seis perfiles de suelo de los sitios seleccionados del área de riego de Salapa, determinada por triplicado in situ mediante el método del hoyo barrenado invertido (Porchet), oscilan entre 0,007 m d⁻¹ y 0,07 m d⁻¹, equivalente a muy lenta y lenta, respectivamente (Cuadro 14).

Los menores valores de Ks corresponden al uso del suelo con pasto; sin embargo, se considera que los valores más bajos de este parámetro (P1Z, P4Z, P5Z) estarían relacionados con textura pesada del tercer horizonte (arcillosa). No se evidencia una relación consistente entre la pendiente del terreno y la conductividad hidráulica saturada en el interior del suelo.

Cuadro 14. Conductividad hidráulica saturada del tercer horizonte de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno, determinada por el método del barreno invertido (Porchet) en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago

Perfil	Uso del suelo	Horizonte	Profund. cm	Repetic. 1 m día ⁻¹	Repetic. 2 m día ⁻¹	Repetic. 3 m día ⁻¹	Promedio m día ⁻¹	Equivalencia
P1Z	Pasto	Bth	35 - 55	0,001	0,018	0,005	0,008	Muy lenta
P2Z	Hortalizas	BCh	30 - 65	0,07	0,07	0,06	0,06	Lenta
P3Z	Hortalizas	C	16 - 100	0,075	0,062	0,086	0,07	Lenta
P4Z	Pasto	BC	22 - 40	0,005	0,005	0,11	0,04	Lenta
P5Z	Pasto	BC1	23 - 66	0,005	0,009	0,06	0,02	Muy Lenta
P6Z	Hortalizas	Bt2	31 - 55	0,06	0,072	0,084	0,07	Lenta

La prueba de Rangos Múltiples de Tukey con un nivel de significancia del 5% para establecer el orden de mérito del factor uso del suelo, indica que el uso con hortalizas (0,07 m d⁻¹) es estadísticamente diferente al uso con pasto (0,03 m d⁻¹); esta situación se podría explicar desde dos aproximaciones. La primera, sugeriría que la compactación del suelo por efecto del pisoteo del ganado afectaría también al tercer horizonte, lo cual no es muy probable; en cambio, la segunda indicaría que el uso con hortalizas tendría grietas internas en el suelo a consecuencia de una menor aplicación del agua de riego en relación a los pastos, dado que las hortalizas se riegan con microaspersores y los pastos con aspersores, por lo que el agua en el primer caso no alcanzaría completamente el tercer horizonte.

3.3.3. Infiltración

3.3.3.1. Infiltración básica

Los valores promedio de la infiltración básica resultantes de las tres repeticiones realizadas por el método del doble anillo en cada uno de los sitios de los seis perfiles representativos del área de Salapa del Sistema de Riego Santiago (Cuadro 15), oscilan entre 0,1 cm h⁻¹ y 4,1 cm h⁻¹, ubicándose en las categorías de muy lenta y media, respectivamente. En la figura 13 se presentan las curvas de la infiltración acumulada promedio de cada perfil, en las que el uso del suelo con hortalizas presentan una mayor infiltración acumulada, lo que permitiría una mayor acumulación de agua en el perfil ante la ocurrencia de precipitaciones de alta intensidad y corta duración, y/o a la aplicación de las

láminas de riego, disminuyendo la escorrentía superficial y el riesgo de erosión del suelo, y aumentando la disponibilidad de agua para los cultivos.

Cuadro 15. Infiltración básica de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno, determinada con cilindros infiltrometros en el área de Salapa del Sistema de Riego Santiago

Perfil	Uso del suelo	Pendiente %	Repeticón 1 cm h^{-1}	Repeticón 2 cm h^{-1}	Repeticón 3 cm h^{-1}	Promedio cm h^{-1}	Equivalencia
P1Z	Pasto	28	0,11	0,07	0,11	0,1	Muy lenta
P2Z	Hortalizas	20	0,14	0,54	0,93	0,53	Mod. Lenta
P3Z	Hortalizas	12	0,99	1,05	0,03	0,69	Mod. Lenta
P4Z	Pasto	14	1,2	0,08	0,03	0,44	Lenta
P5Z	Pasto	3	0,09	0,01	0,45	0,18	Lenta
P6Z	Hortalizas	7	3,7	4,4	4,1	4,1	Media

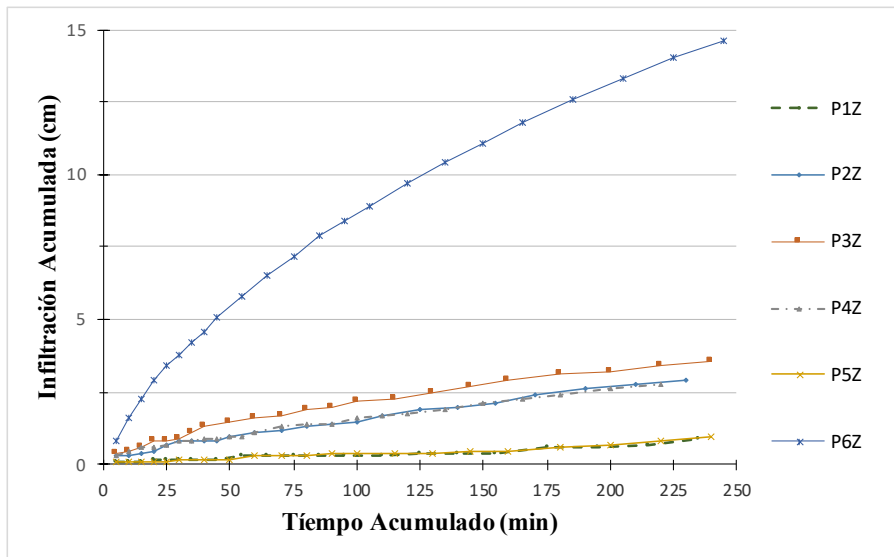


Figura 13. Curvas de infiltración acumulada de los seis perfiles, para diferentes usos del suelos y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago

La prueba de Rangos Múltiples de Tukey para el nivel de significancia del 5% para el factor uso del suelo, evidenció que la infiltración básica en el uso con hortalizas ($1,76 \text{ cm h}^{-1}$) es estadísticamente diferente al uso con pasto ($0,24 \text{ cm h}^{-1}$). La disminución de la infiltración en el uso con pastos se atribuye a la compactación del suelo producto del sobrepastoreo del ganado bovino; al

respecto, los resultados encontrados concuerdan con aquellos reportados por los siguientes autores:

- Glab (2011) indica que la compactación edáfica se constituye en un medio inadecuado para el crecimiento radical y la dinámica hídrica en el perfil (infiltración, conductividad hidráulica y almacenamiento).
- Nguyen *et al.*, (1998) sostienen que con humedades edáficas elevadas, el impacto de la pezuña puede provocar la densificación y la deformación de la superficie del suelo, generando en una disminución de los niveles de ingreso de agua al perfil.
- Martínez *et al.*, (2010) encontraron que la infiltración básica disminuyó aproximadamente a la mitad de su valor ($0,16 \text{ cm h}^{-1}$) por efecto del pisoteo animal, respecto del suelo testigo de carga nula ($0,35 \text{ cm h}^{-1}$).
- De la Orden *et al.*, (2006) reportan que una mayor carga animal por hectárea modificó severamente la infiltración, favoreciendo los procesos erosivos en un pastizal de altura en las Cumbres de Humaya (Catamarca, Argentina).
- Denoia *et al.*, (2010) señalan que la densificación del suelo por pisoteo de los animales (disminución volumétrica por efecto del impacto de la pezuña animal) afectó negativamente la capacidad de infiltración en un Argiudol vértico, de textura franco limosa (provincia de Santa Fe, Argentina).
- Baker (2014) indica que la infiltración es probablemente el parámetro más sensible a la compactación por pisoteo, ya que afecta la macro - porosidad superficial, principal vía de circulación de agua de infiltración.
- Echavarría *et al.*, (2007) señalan que conforme se incrementa la carga animal y el período de estancia del ganado en el potrero, el pisoteo de los animales produce la destrucción paulatina de los agregados del suelo y el incremento de la densidad aparente, originando problemas de compactación que afectan negativamente la infiltración, la retención de humedad y aumentan los riesgos de erosión.
- Mwendera y Saleem (1997) al comparar diferentes intensidades de pastoreo animal por unidad de mes y hectárea (AUM ha^{-1}) encontraron

que intensidades de 3 a 4 AUM ha⁻¹ aumentaron significativamente la escorrentía y la pérdida de suelo superficial y redujeron la infiltración, en contraste con intensidades entre 0,6 AUM ha⁻¹ y 1,8 AUM ha⁻¹; además, los suelos de textura fina fueron más susceptibles a la compactación que aquellos de textura gruesa.

- Fernández *et al.*, (2006) citados por Martínez *et al.*, (2010) encontraron que la tasa de infiltración fue afectada significativamente por el pastoreo, siendo 31,0% y 62,8% más baja, en sistemas mixtos que en agricultura continua, respectivamente, en un suelo Argiudol y en un Hapludol.

En el caso del uso del suelo con hortalizas del área de Salapa, la infiltración básica promedio (1,76 cm h⁻¹) es menor a los valores que reportan Neris *et al.*, (2012) para el uso con cultivos (6,7 cm h⁻¹) bosque de pinos (18,8 cm h⁻¹) y bosque verde (79,6 cm h⁻¹).

Por otro lado, la prueba de rangos múltiples de Tukey (5% de significancia) para el factor pendiente del terreno, determinó que la infiltración básica del rango de 0 - 8% (2,1 cm h⁻¹), es estadísticamente diferente en relación a los rangos de 8 - 16% (0,56 cm h⁻¹) y >16% (0,32 cm h⁻¹).

La disminución de la infiltración básica al incrementarse el grado de inclinación del terreno en los casos estudiados de Salapa, se podría atribuir a la mayor erosión que se ha producido al aumentar la pendiente, lo que ha ocasionado que el horizonte A se haya erosionado, casi aflorando a la superficie el horizonte Bt (de acumulación de arcilla iluvial, el cual es denso y de textura pesada).

Los resultados anotados difieren con aquellos encontrados por Bamutaze *et al.*, (2009) quienes estudiaron la variación espacial de la infiltración en terrenos de 12 a 32% de pendiente con cultivos anuales (maíz, fréjol, maní) y perennes (plátano, café) en suelos volcánicos del Monte Elgon, en el Este de Uganda; en los cuales, la velocidad de infiltración se incrementó con el aumento de la pendiente del terreno, por lo que sostienen que a medida que se incrementa la pendiente, más partículas finas son transportadas por el flujo superficial, reduciendo así la probabilidad de obstrucción de los poros. Argumentos similares reportan Asmamaw y Mohammed (2012) en relación al efecto de la inclinación del terreno y los cambios de uso sobre las propiedades físico - químicas de un suelo de la cuenca Gerado al nororiente de Etiopía, en el que el contenido de arcilla tuvo una variación significativa para los rangos

de pendiente inclinada y fuerte. En todo caso, es preciso recalcar que estos fenómenos no son similares a la situación de la degradación de los suelos del área de Salapa, tanto por su textura pesada, como por los procesos erosivos.

3.3.3.2. Relación de la infiltración con otras propiedades del suelo

A continuación se discuten los resultados de las regresiones lineales simples entre la velocidad de infiltración básica (variable dependiente) de los seis sitios estudiados del área de Salapa y las siguientes propiedades del suelo: densidad aparente, porosidad total y macroporosidad (variables independientes).

3.3.3.2.1. Infiltración básica vs densidad aparente

Los valores más bajos de densidad aparente en los seis sitios representativos del uso del suelo y la pendiente del terreno del área de Salapa, corresponden a los mayores valores de infiltración básica (Figura 14). El coeficiente de determinación fue de 0,937 lo que indica que el 93,7% de la disminución de la velocidad de infiltración básica se debe a incrementos en la densidad aparente del suelo (relación negativa). Ellos es coherente; por cuanto, al disminuir la densidad aparente aumenta el volumen total de poros lo cual facilita el ingreso del agua al suelo.

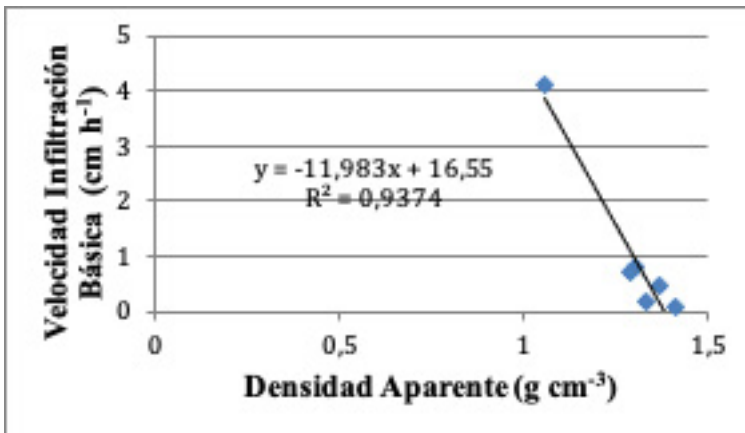


Figura 14. Regresión lineal entre la velocidad de infiltración básica y la densidad aparente de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago

3.3.3.2. Infiltración básica vs porosidad total

A medida que aumenta la infiltración básica también lo hace la porosidad de los suelos del área de estudio (Figura 15). Aunque el coeficiente de determinación para esta relación es bajo, indica que el aumento de la infiltración básica está determinado en 34,3% por el aumento en la porosidad. Ello se explica en razón de que los poros son las cavidades naturales del suelo que contienen y conducen el agua; sin embargo, coincidiendo con Dexter (1998), que no es solamente la cantidad total de poros en el sólido lo que define el comportamiento hídrico del suelo, sino también, y en muchos casos de manera predominante, las características específicas del sistema de poros, en términos de forma, tamaño y distribución.

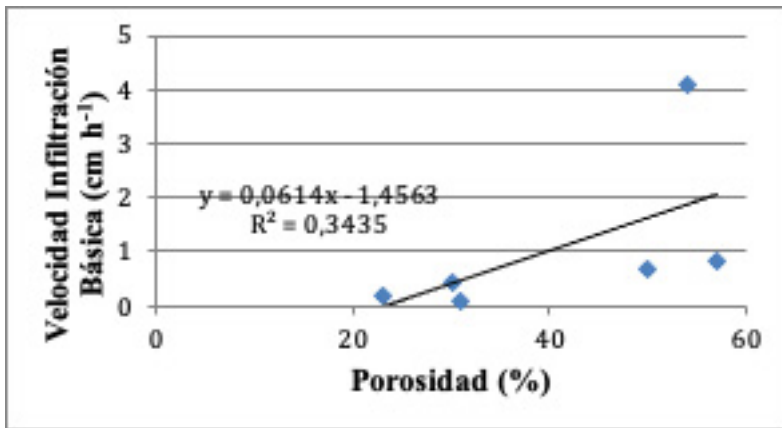


Figura 15. Regresión lineal entre la velocidad de infiltración básica y la porosidad de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago

3.3.3.2.3. Infiltración básica vs macroporosidad

En los suelos estudiados, a medida que aumenta la macro - porosidad (capacidad de aireación) también lo hace la velocidad de infiltración básica (Figura 16). El 23,3% del aumento en la velocidad de infiltración del agua está en función del incremento en la macroporosidad del suelo; ello, en razón de que la macro-porosidad es la encargada de la circulación del aire y del agua, por lo que, mientras mayor sea el tamaño de los poros del suelo, más fácil será la transmisión del agua. Al respecto, es pertinente indicar que la pérdida de volumen que experimenta un suelo con problemas de compactación es a costa de los poros grandes (macroporos), favoreciendo la generación de condiciones anaeróbicas (Stepniewski *et al.*, 1994).

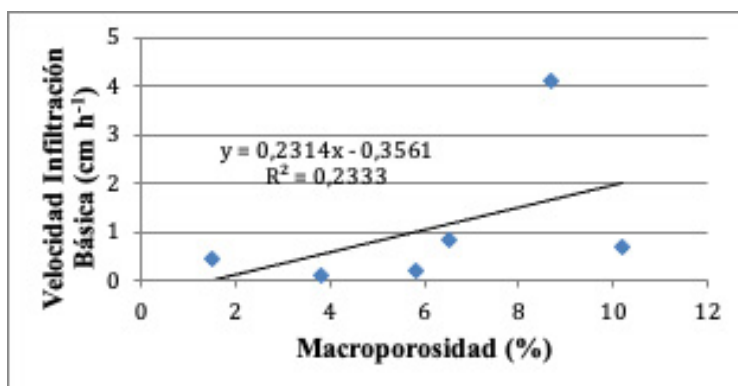


Figura 16. Regresión lineal entre la velocidad de infiltración básica y la macroporosidad de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago

3.4. Compactación del suelo

3.4.1. Resistencia del suelo a la penetración

Los valores promedio de la resistencia del suelo a la penetración (compactación) de la capa superior de los suelos representativos de la combinación uso del suelo y pendiente del terreno del área de Salapa del Sistema de Riego Santiago, determinados en el campo con el penetrómetro manual (Cuadro 16), oscilan entre 0,56 (P6Z) a 1,34 MPa (P1Z). Es notable que al uso de la tierra con pastos le corresponden los valores más altos de este parámetro.

Cuadro 16. Resistencia a la penetración de la capa superior de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno, determinada con el penetrómetro manual en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago

Perfil	Uso del suelo	Pendiente %	Repet. 1 MPa	Repet. 2 MPa	Repet. 3 MPa	Repet. 4 MPa	Repet. 5 MPa	Promed. MPa	Equivalencia
P1Z	Pasto	28	1,50	1,20	1,45	1,30	1,27	1,34	Moderada
P2Z	Hortalizas	20	0,67	0,76	0,61	0,67	0,76	0,69	Baja
P3Z	Hortalizas	12	0,61	0,67	0,48	0,76	0,54	0,61	Baja
P4Z	Pasto	14	1,15	1,10	1,20	1,36	1,20	1,20	Moderada
P5Z	Pasto	3	0,91	0,91	0,97	1,15	0,91	1,16	Moderada
P6Z	Hortalizas	7	0,61	0,55	0,48	0,55	0,61	0,56	Baja

Según la prueba de rangos múltiples de Tukey al nivel de significancia del 5% para el factor uso del suelo, la resistencia del suelo a la penetración para el uso con pastos (1,3 MPa) es estadísticamente diferente al uso con hortalizas (0,61 MPa), equivalentes a moderada y baja respectivamente. Esto confirma que la mayor compactación es causada por el recurrente pisoteo del ganado bovino; al respecto Warren *et al.*, (1986) indican que el contacto de la pezuña en movimiento con la superficie del suelo provoca la destrucción de los agregados existentes, afectando negativamente a las fuerzas que mantienen la estabilidad.

Además, los resultados de la prueba de Tukey al nivel de significancia del 5% para el factor rangos de pendiente del terreno, indican que los valores son estadísticamente diferentes entre sí, los cuales se incrementaron con la pendiente, de la manera siguiente: 0,77 MPa (baja); 0,91MPa (baja) ;y, 1,03 MPa (moderada) para los rangos de 0 - 8%, 8 - 16% y >16% de pendiente, en su orden. Este fenómeno estaría asociado a los procesos erosivos que son más graves en los terrenos de mayor inclinación, los cuales, como ya fue mencionado, progresivamente han eliminado la mayor parte del horizonte A original del suelo y han acercado a la superficie el horizonte Bt de textura pesada y más denso.

3.4.2. Relación de la resistencia a la penetración con otras propiedades del suelo

3.4.2.1. Resistencia a la penetración vs porosidad total

La Figura 17 permite inferir que a mayor porosidad es menor la resistencia del suelo a la penetración. La disminución de la resistencia a la penetración se debe al incremento de la porosidad. Ello encaja en la explicación que da Alameda (2010) quien señala que la compactación del suelo es un empaquetamiento de las partículas que constituyen la fase sólida, lo que se traduce en una disminución del espacio poroso total; y, consecuentemente, en un aumento de la densidad aparente. Complementariamente, Warren y Taylor (2010) anotan que el principal efecto que ejercen las fuerzas de compresión sobre el suelo es el cambio en la porosidad, especialmente una variación en la distribución del tamaño de poros. A medida que las fuerzas de compresión aumentan, los poros más grandes colapsan; en otras palabras, un incremento en la densidad del suelo implica una reducción del espacio poroso, especialmente de los poros de gran tamaño.

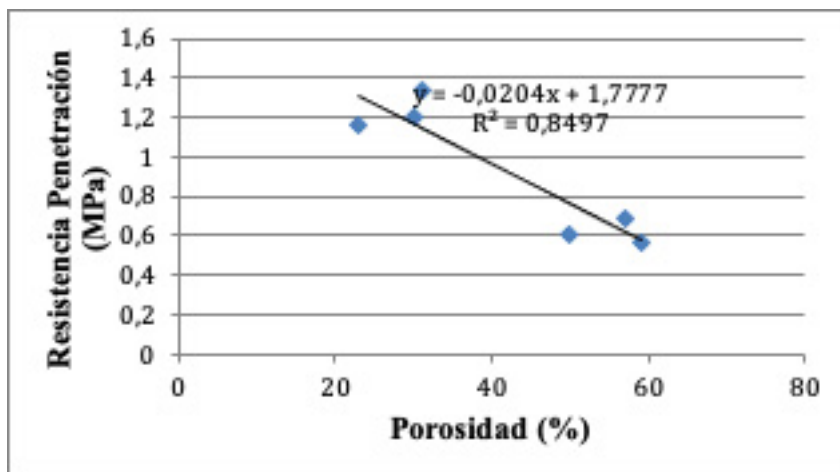


Figura 17. Regresión lineal entre la resistencia a la penetración y la porosidad de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salapa del Sistema de Riego de Santiago

3.4.2.2. Resistencia a la penetración vs densidad aparente

Según la Figura 18 en los suelos del área de Salapa a mayor densidad aparente se incrementa la resistencia a la penetración. Esto concuerda con lo que afirman los siguientes autores:

- Taboada (2007) indica que cuando un suelo es sometido a una determinada presión, se produce una reducción en su volumen, lo que se traduce en un aumento de la densidad aparente. Específicamente, los suelos bajo pastoreo animal aumentan significativamente la densidad aparente.
- Denoia *et al.*, (2010) encontraron que la densidad aparente de un Argiudol vértico se incrementó y fue estadísticamente diferente, debido a la disminución volumétrica por efecto del impacto de la pezuña animal.
- Echavarría *et al.*, (2007) concluyen que la disminución del pisoteo y presión de uso del suelo influyeron positivamente en las características físicas del mismo, al no incrementar los valores de densidad aparente.
- Jiménez *et al.*, (2012) en un suelo con pasturas de *Brachiaria humidicola* encontraron que el pisoteo del ganado afectó negativamente la densidad aparente de los primeros 10 cm; incluso, la capa de 10 - 40 cm presentó alta resistencia a la penetración (> 2,80 MPa).

- Ramírez y Salazar (2010) concluyen que el aumento de la densidad aparente fue el factor físico que más influyó en el incremento de la resistencia a la penetración en un Andisol de Antioquia, Colombia.

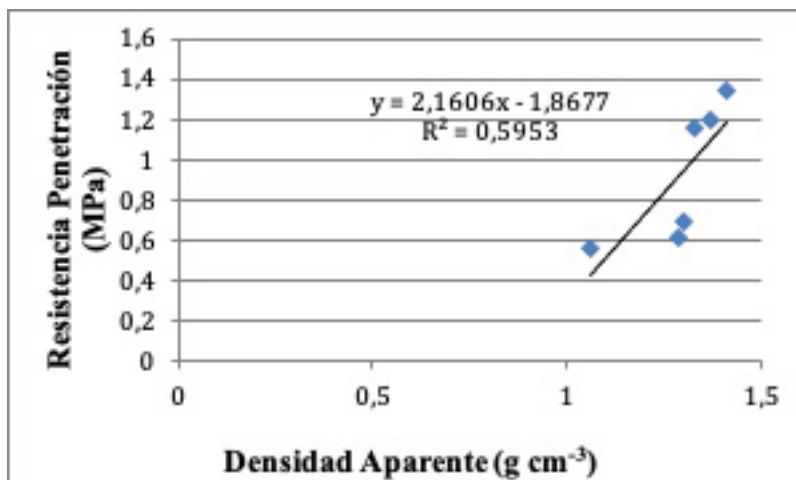


Figura 18. Regresión lineal entre la resistencia a la penetración y la densidad aparente de los seis perfiles, para diferentes usos del suelo y rangos de pendiente del terreno en el área de Salaya del Sistema de Riego de Santiago

4. **Recomendaciones para el Aprovechamiento Sostenible del Suelo y el Agua en el Sistema de Riego Santiago**

Las recomendaciones técnicas para el aprovechamiento sostenible del suelo y el agua en las áreas beneficiadas del Sistema de Riego Santiago (que también serían aplicables a otras áreas de la Zona 7 del país, de características biofísicas y socioeconómicas similares), en la doble perspectiva de asegurar altos rendimientos de la producción agropecuaria y prestar continuamente los servicios ambientales que la población y la naturaleza demandan, sin degradar su capacidad productiva, ni afectar a las zonas bajas, indispensablemente se deben sustentar, tanto en el conocimiento preciso de las limitaciones naturales de los suelos, como de los procesos de degradación que por acción humana los vienen afectando, cuya identificación ha sido posible gracias al estudio de las características físico - químicas de los suelos y su comportamiento hidrodinámico del área de Salapa, que han sido ampliamente discutidos con suficiente fundamentación científica en el Capítulo 3 de esta obra, del mismo que se derivan las siguientes conclusiones:

1. Los suelos internamente presentan drenaje pobre (P1Z, P2Z y P5Z) debido a la presencia ya sea en la superficie o a poca profundidad de capas arcillosas, en las que se cuelga el agua de lluvia o de riego, generando condiciones temporales alternas de oxidación y reducción en la zona de las raíces, limitando el movimiento del agua a las capas más profundas, y su posterior evacuación a los drenes naturales, como debería ocurrir en un proceso normal de regulación del ciclo hidrológico.
2. La profundidad efectiva de los suelos, que corresponde al espesor en el que se encuentran las raíces, es escasa. Los menores valores de este parámetro ocurren en el uso con hortalizas (16 a 40 cm, en los perfiles P3Z y P2Z, respectivamente), siendo un poco mayor en los pastos (40 a

- 55 cm, en los perfiles P4Z y P1Z en su orden); excepto, en el perfil P5Z en el cual la presencia de un horizonte arcilloso temporalmente saturado impide la penetración de las raíces a los horizontes inferiores.
3. Debido a la recurrente labranza del suelo y la menor cobertura vegetal, el mayor grado de erosión hídrica laminar antrópica corresponde al uso con hortalizas (P2Z y P3Z) siendo menos marcado este fenómeno en los pastos (P1Z y P4Z), y en los terrenos ondulados y planos (P5Z y P6Z).
 4. En los terrenos de uso con hortalizas, cuando no han sido regados, desde la superficie se observan grietas o fisuras de 5 mm de ancho que se extienden hasta 30 cm de profundidad, distanciadas entre 15 a 20 cm unas de otras, lo que evidencia la presencia de una importante proporción de arcillas expansivas que producen el agrietamiento del suelo cuando éste se seca.
 5. Los suelos son fuertemente ácidos en los terrenos de los sitios más altos, debido a la llovizna más frecuente y la menor temperatura (Perfil 5 y Perfil 6: pH 5,0 - 5,2 respectivamente); en tanto que, en los sitios más bajos el pH es medianamente ácido (5,7).
 6. La acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) se ubica en el rango de bajo a medio en los dos primeros horizontes de los suelos; pero, se incrementa bruscamente a un nivel muy alto (tóxico) en los horizontes inferiores.
 7. El contenido de materia orgánica es muy alto en el uso con pastos y medio en el uso con hortalizas. Dentro del perfil, en ambos tipos de uso del suelo, el contenido de materia orgánica disminuye progresivamente con la profundidad hasta un rango bajo.
 8. En los dos tipos de uso, la escasa capacidad de aireación de las dos capas superiores del suelo (zona radicular) constituye el mayor factor físico limitante para el crecimiento de las raíces (y por ende de la producción agropecuaria), el cual es más grave en el uso con pastos, atribuible al sobrepastoreo del ganado bovino, lo que ha producido la compactación del suelo, el incremento de la densidad aparente, la destrucción de la estructura (amasado del suelo) y la pérdida de la macro - porosidad, por lo que la condición física para el crecimiento de las plantas es muy pobre. La situación es menos grave en el uso con hortalizas, dos de cuyos

perfiles (P2Z y P3Z) pertenecen a la zona pobre y solamente el perfil P6Z a la zona media, lo cual estaría asociado al efecto de las labores de labranza para el cultivo de hortalizas que han expandido el suelo.

9. El rango agua aprovechable es muy alto en la primera y segunda capa de los suelos de uso con hortalizas, y en la segunda capa de los suelos con pasto, lo cual estaría asociado a su textura fina; sin embargo, en el primer horizonte de los suelos con pasto el agua aprovechable es menor (medio - muy bajo), que aunque también son de textura fina, el espacio de los poros medianos se habría reducido por efecto de la compactación.
10. La disminución de la macroporosidad en la zona de mayor proliferación de las raíces, con la concomitante disminución del intercambio de CO_2 y O_2 , particularmente en el uso del terreno con pastos, determina las siguientes características del comportamiento hidrodinámico de estos suelos: 1.- infiltración básica muy lenta y lenta, que en las laderas con lluvias de alta intensidad favorece fuertes escurrimientos superficiales y marcados procesos erosivos, lo que genera la afectación de los terrenos y la infraestructura de las partes bajas, tal es el caso de la urbanización Sauces Norte; 2.- conductividad hidráulica saturada muy baja, lo que se traduce en un drenaje interno muy lento; y, 3.- valores altos de la resistencia del suelo a la penetración (compactación).
11. El riego parcelario se practica sin sustentación científico - técnica, por lo que la mayoría de los usuarios riegan en exceso, generando los siguientes problemas: desperdicio de agua, erosión de los suelos, anegamiento de los terrenos planos y deslizamientos en masa en los terrenos de las áreas más bajas.
12. No se dispone información acerca del contenido óptimo de humedad del suelo para el pastoreo del ganado bovino, y para la realización de las labores de labranza, tanto para los cultivos hortícolas, como para la renovación de los pastos.

En el contexto arriba enunciado, las recomendaciones técnicas propuestas en base al conocimiento actualmente disponible y de aquellas que se deben generar a través de la investigación, deben dar contestación a las interrogantes que a continuación se plantean, indispensable en esta zona de producción agropecuaria donde no hay más tierra cultivable y el agua de riego se vuelve

progresivamente más escasa, debido a la creciente expansión de la zona urbana de la ciudad de Loja, lo que implica, además, que cada vez el costo de la tierra sea más atractivo para urbanizar antes que para producir. A esto se suma, el cambio climático (calentamiento global) que conlleva períodos de estiaje más prolongados, aumento de la evapotranspiración (mayor uso consuntivo y demanda de riego), y una mayor recurrencia de lluvias torrenciales destructivas:

1. ¿Cómo incrementar la profundidad efectiva para que las raíces exploren un mayor volumen y mejorar el drenaje interno de estos suelos, que están conformados por capas arcillosas, para evitar que se cuelgue el agua de lluvia o de riego, de manera que sea evacuada progresivamente a los drenes naturales y se mejore la regulación del ciclo hidrológico de la microcuenca?
2. ¿Cómo optimizar la aplicación del agua de riego en los dos tipos de uso del suelo, con la finalidad de disminuir la erosión hídrica laminar por efecto de la fuerte escorrentía en los terrenos inclinados, y evitar el anegamiento de los terrenos planos, en ambos casos, por efecto de las lluvias torrenciales o el riego excesivo?
3. Cómo elevar el pH de la capa arable en los suelos fuertemente ácidos y evitar que se acerquen a la superficie las capas internas que presentan un rango tóxico de acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$)?
4. ¿Cómo incrementar el contenido de materia orgánica en la capa arable en los terrenos que producen hortalizas?
5. ¿Cómo gestionar la fertilidad del suelo para proveer oportunamente y en la correcta cantidad que los cultivos y pastos demandan, los macro elementos (N, P, K) identificados como muy deficientes en el estudio de suelos del Sistema de Riego Santiago (también Ca y Mg), y algunos micronutrientes, entre otros el B?
6. ¿Cómo incrementar la capacidad de aireación y reconstruir la estructura en las dos capas superiores del suelo, de manera de asegurar las mejores condiciones físicas para el crecimiento de las raíces (pastos, cultivos y árboles)?

7. ¿Cómo incrementar la oferta de materia seca de alta calidad nutricional en las praderas destinadas al pastoreo, para asegurar la nutrición continua del hato ganadero lechero?
8. Cómo mejorar los sistemas de pastoreo y de renovación de potreros, para garantizar un óptimo aprovechamiento de la pradera, a la vez de evitar la compactación del suelo y todas sus secuelas que afectan al comportamiento hidrodinámico del mismo?
9. ¿Cómo aprovechar los efectos benéficos de los árboles (maderables y frutales), en los dos tipos de uso del terreno, y diversificar los ingresos de los productores agropecuarios?
10. ¿Cuál deberá ser el contenido óptimo de humedad del suelo, tanto para el pastoreo del ganado bovino, como para la renovación y reemplazo de potreros, y el tipo de maquinaria agrícola requerido?

Cabe advertir que las recomendaciones técnicas que a continuación se proponen para los dos tipos de uso del suelo, se fundamentan en el estado del arte de los conocimientos científicos obtenidos por otros investigadores en condiciones biofísicas y socioeconómicas similares, así como, en las experiencias exitosas de los productores progresistas y visionarios de la zona; sin embargo, queda pendiente impulsar la investigación aplicada orientada a dar respuesta plena a las interrogantes planteadas, sobre la base de resultados científicamente comprobados.

4.1. Uso del suelo con pastos

En el área de influencia del Sistema de Riego Santiago, el uso de los suelos con pastos para el ganado bovino es de alrededor del 97% del total del área dedicada a la actividad agropecuaria, cuya producción de leche y sus derivados (queso amasado y quesillo, elaborados con leche cruda) abastece en buena parte el demandante y seguro mercado de la ciudad de Loja. Ello es de enorme importancia, tanto por ser fuente de ingresos económicos, como de oportunidad de trabajo para todos aquellos que participan en esta actividad productiva.

Seguidamente se proponen algunas prácticas consideradas viables de ser implementadas por los ganaderos sobre: manejo de praderas, sistemas de

pastoreo del ganado, carga animal, renovación y reemplazo de potreros, gestión física y química del suelo; y, manejo del agua y conservación de suelos.

4.1.1. Sistemas de ganadería sostenible

Actualmente el sector ganadero es reconocido como uno de los tres mayores responsables de los más serios problemas medio ambientales a nivel mundial, los cuales tienen que ver con la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad, el calentamiento global dado por las emisiones de gases invernadero a la atmósfera, y la disminución y contaminación del agua (Steinfeld *et al.*, 2009). La intensidad de estos impactos dependen de los distintos sistemas de producción ganaderos (FAO, 2009).

En respuesta a los múltiples problemas ambientales causados por la ganadería tradicional, es indispensable promover una ganadería sostenible, fundamentada en el equilibrio entre la conservación de los recursos naturales, la productividad de la finca y la calidad de vida de las familias productoras; en otras palabras, según Méndez (2008), una actividad bovina enmarcada en el triángulo de la sostenibilidad, que simboliza el equilibrio necesario del sistema de producción que sea: ambientalmente responsable, económicamente rentable y socialmente justo.

Al respecto, resulta pertinente hacer referencia al balance de carbono en praderas bien manejadas; es decir, destinadas al pastoreo de vacas lecheras, fertilizadas y drenadas adecuadamente, a lo que se suma la emisión de CO₂ proveniente de la mecanización agrícola necesaria para lograr el manejo antes mencionado, que da como resultado un valor positivo de 8,3 t ha⁻¹ año⁻¹ de carbono secuestrado de la atmósfera y que finalmente ingresa al suelo como materia orgánica (FAO, 2009).

El método de pastoreo tiene una gran influencia en la sanidad de los animales, su producción y estado de los pastizales. Soltar los animales y dejarlos hasta generar el sobrepastoreo, conduce a un despilfarro y a un cansancio del pasto. Ello obliga a los animales a consumir un pasto poco adecuado a sus necesidades (pobre porque es demasiado maduro o desequilibrado porque es demasiado joven) (Velásquez, 2013).

El sistema de pastoreo es el programa de manejo de pastoreo, constituido por períodos de utilización y descanso de dos o más potreros, su principal objetivo,

es obtener una producción de forraje estable, de buena calidad y con utilización eficiente del recurso (Meneses y López, 2007).

Existen diferentes sistemas de manejo del ganado y la vegetación; sin embargo, dadas las condiciones biofísicas y socio económicas imperantes en las áreas del Sistema de Riego Santiago, se asume que los sistemas Silvopastoril, y su variante el Pastoreo Racional Voisin (PRV), serían los que mejor se enmarquen en el triángulo de la sostenibilidad, los cuales se describen más adelante.

Es pertinente mencionar que en el sistema de pastoreo continuo, en el que los animales del hato se encuentran las 24 horas del día en los potreros, los cuales son rotados periódicamente (Martínez, 2007), si bien tiene como principales ventajas el bajo costo de producción (carne o leche) y menor requerimiento de fuerza de trabajo, existen desventajas como la compactación del suelo y las pérdidas de forraje por daño del animal (González, 2018), por lo que se considera no recomendable para las áreas de terrenos arcillosos del Sistema de Riego Santiago.

Así mismo, es oportuno hacer referencia al sistema estabulado, en el que los animales se encuentran encerrados todo el tiempo, en condiciones totalmente artificiales de temperatura, luz y humedad principalmente (Marín, 2011), con lo cual se pretende lograr una mayor producción tanto de carne como de leche en el menor tiempo posible, a través de proporcionar cantidades adecuadas de alimento de buen valor nutritivo que consisten en dietas que se formulan con altas cantidades de concentrados, ensilajes y henos (Anfinnsen *et al.*, 2009), aproximándose a la satisfacción de los requerimientos del animal, para que éste muestre todo su potencial en la producción (Martínez, 2007); sin embargo, demanda una gran inversión de capital para brindar las condiciones de infraestructura, tecnología, alimentación, mano de obra capacitada e implementos y equipos sofisticados, que podría convertirse en capital perdido si el negocio no funciona (Bretschneider y Salado, 2010).

Además, si bien la ganadería estabulada reduce el área de explotación, concentra los desechos en un solo sitio, lo que puede causar impacto ambiental si no se le da el manejo adecuado (Fallas, 2006). También, la estabulación permanente no es viable para todo tipo de ganado, idealmente solo debe ser estabulado el ganado destinado al engorde, mientras que la cría o la lechería, o en general las hembras bovinas en su etapa productiva, como máximo deben ser manejadas en un método combinado entre potrero y establo (semi - estabulación), para

que así no se afecte su ciclo de vida y se pueda lograr con ellas un muy buen aprovechamiento (Arroniz, 2007).

En relación a lo anterior, es pertinente mencionar la investigación de Martínez (2007) en El Zamorano (Honduras), quien estudió la evaluación económica de los sistemas de producción bovina: pastoreo libre, semi - estabulado y estabulado, cuyos resultados indican que el sistema de pastoreo libre representó la mayor utilidad neta por los menores costos de producción; mientras que, el sistema estabulado obtuvo pérdidas debido a la alta dependencia de mano de obra y maquinaria.

Por las consideraciones anotadas, el sistema estabulado tampoco sería aplicable a las áreas del Sistema de Riego Santiago, al menos para los pequeños y medianos ganaderos.

4.1.1.1. Sistemas silvopastoril

Un sistema silvopastoril es una opción de producción agropecuaria que involucra la presencia de plantas leñosas perennes (árboles y/o arbustos) que interactúan con los componentes tradicionales (forrajeras, herbáceas y animales), todos ellos bajo un sistema de manejo integral (Ojeda *et al.*, 2003).

Luccerini *et al.*, (2012) señalan que en los sistemas silvopastoriles interactúan cinco componentes: el arbóreo, el ganadero, el forrajero, el suelo y el clima. De éstos, se consideran como primarios el arbóreo (“silvo” que denota la palabra bosque) y el forrajero (“pastoril”).

Los sistemas silvopastoriles son también una opción para revertir los procesos de degradación de los pastizales al aumentar la protección física del suelo y contribuir a la recuperación de la fertilidad con la intervención de leguminosas que fijan el nitrógeno del aire al suelo, y de árboles de raíces pivotantes que aprovechan las capas profundas y reciclan los nutrientes (Nair *et al.*, 2009).

El propósito de estos sistemas es lograr un sinergismo entre los animales, los pastos, los árboles y el suelo, para mejorar la productividad y sostenibilidad; así como, generar beneficios ambientales (Burley y Speedy, 1998). Constituyen las modalidades más prometedoras de los sistemas agroforestales, desde el punto de vista productivo, ecológico, económico y social (Alonso, 2011).

El tipo de sistema silvopastoril a ser implementado depende de: la topografía del terreno, el tipo de suelo y la presencia de áreas estratégicas para la conservación del agua, el suelo y la biodiversidad. Consecuentemente, en un proceso de zonificación de la finca, habrán: áreas para proteger debido a su fragilidad o importancia para la conservación de la biodiversidad o el agua; áreas donde el pastoreo deba ser evitado pero que pueden ser usadas para la producción de forrajes; y, áreas de pasturas con baja y alta densidad de árboles. Este enfoque implica un mejoramiento e intensificación de la producción en algunas áreas de la finca (Murgueitio e Ibrahim, 2004).

Los sistemas silvopastoriles, principalmente se han establecido con el objetivo de proporcionar forraje a los animales; sin embargo se han desconocido otro tipo de beneficios, tales como: el mejoramiento de la fertilidad del suelo a través del reciclaje de nutrientes y la fijación de nitrógeno realizada por algunas especies (aliso, por ejemplo en la zona); la regulación del balance hídrico al conservar agua y reducir la evaporación; la fijación de CO₂; la diversificación de la producción de la finca (madera, leña, frutos, entre otros); y, la reducción del estrés calórico de los animales a través del efecto de la sombra (Navas, 2010).

En los sistemas silvopastoriles la acción conjunta de las lombrices, los escarabajos y los milpiés, contribuye a mejorar la calidad de los suelos, debido a que participan en la degradación de la hojarasca y de la materia orgánica, proceso durante el cual se remueven grandes cantidades de suelo, lo cual permite mejorar las condiciones físicas de los suelos de los potreros en la zona radicular (Zuluaga *et al.*, 2011).

Las lombrices de tierra tienen funciones específicas importantes para el mejoramiento de la calidad del suelo. Algunas habitan las capas superiores y participan en la circulación de nutrientes al descomponer la materia orgánica. Otras que habitan en sustratos más profundos, modifican la estructura del suelo con su actividad cavadora y de producción de heces. En los potreros ganaderos con diferentes estratos de vegetación, se promueve el establecimiento de lombrices en las diferentes capas del suelo, lo cual mejora los procesos de descomposición, aireación y descompactación del suelo, con importantes repercusiones para la producción del pasto y la capacidad de infiltración y retención de agua.

Según Ruiz (2007) la agroforestería pecuaria proporciona niveles altos de sostenibilidad agronómica (reducción del riesgo debido a plagas y enfermedades,

mayor utilización y mejoramiento del reciclaje de nutrientes); sostenibilidad económica (diversas fuentes de ingreso); sostenibilidad social (abastecimiento de diversos productos agropecuarios, mayores oportunidades de trabajo); y, sostenibilidad ecológica (mayor acumulación de biomasa, mejoramiento del ciclo hidrológico, mayor protección del suelo, mejoramiento de la fauna y la flora; y, diversos servicios ambientales, como la reducción de emisiones de carbono).

4.1.1.1.1. Prácticas silvopastoriles

Existen diferentes formas de combinar los árboles y arbustos con las pasturas y los animales, muchas de ellas muy ingeniosas, lo que ha dado lugar a diferentes prácticas silvopastoriles, entre las que se puede citar: bancos de proteína, cercas vivas, pasturas en callejones; y, árboles y arbustos no forrajeros en potreros. Además, se incluye el pastoreo en plantaciones de árboles maderables o frutales, las barreras vivas y las cortinas rompevientos. La decisión de cuál de estas opciones implementar en la finca, depende de diversos factores: los objetivos del productor, el tamaño de la finca, la localización, la topografía, la disponibilidad de mano de obra; y, los recursos económicos (Zuluaga *et al.*, 2011).

En función de lo enunciado, en el caso de las áreas del Sistema de Riego Santiago, se considera viable implementar las siguientes prácticas silvopastoriles: cercas vivas, bancos de proteína; y, árboles dispersos en los potreros.

Cercas vivas.

Las cercas vivas son aquellas que utilizan árboles y arbustos adaptados a altas densidades entre plantas y podas frecuentes. Este sistema agroforestal originado en la necesidad de delimitar las propiedades, tiene mayor relevancia económica y ecológica, porque su establecimiento significa un ahorro del 54% con respecto al costo de las cercas convencionales (postes de madera, hormigón o hierro), y constituye una forma de reducir la presión sobre el bosque para la obtención de postes y leña, además de que representa una forma de introducir árboles en los potreros (Murgueitio e Ibrahim, 2004).

En el establecimiento de cercas vivas para la división de potreros, linderos y bordes de carreteras y caminos en las áreas del Sistema de Riego Santiago, se recomienda plantar en la misma hilera alternadamente dos tipos especies

leñosas (forestal y frutal), de manera que la cerca, por un lado, actúe como cortina rompe vientos; y, por otro, genere un ingreso económico por la comercialización de las diferentes frutas y el material leñoso. Las especies forestales que se podrían utilizar para las cercas vivas son: aliso (*Alnus acuminata*) y laurel de cera (*Morella pubesceus*); mientras que, los frutales serían: capulí (*Padus capulí*), luma (*Pouteria lúcuma*), ciruela (*Prunus domestica*); y, durazno (*Prunus persica*). El arreglo espacial será uniforme a una distancia de 1,5 a 2,5 m entre árboles⁴

Bancos de proteína.

Una alternativa viable para mejorar la alimentación del ganado es el establecimiento de bancos de proteína, que son áreas compactas sembradas con leguminosas forrajeras herbáceas, rastreras o erectas, o bien de tipo arbustivo, que se emplean para corte o pastoreo directo por los rumiantes, como complemento al pastoreo de gramíneas (Sagarpa, 2010).

Es una práctica de bajo costo para mejorar el contenido de proteínas de la ración alimentaria del ganado, si se considera que las proteínas constituyen uno de los nutrientes más costosos en todas las raciones alimentarias para la producción animal (Orosco, 2010).

Ojeda *et al.*, (2003) indican que las principales ventajas de los bancos de proteína son:

- Pueden establecerse en áreas relativamente pequeñas por la alta densidad de siembra.
- Permiten disponer de forraje durante todo el año, si se realiza un buen diseño y manejo del sistema.
- Cuando se utilizan para corte y acarreo, pueden implantarse en pendientes elevadas.
- Bajo un manejo de corte y acarreo se puede establecer más de una especie forrajera.

4 Zhofre Aguirre, comunicación personal.

- Dependiendo de la capacidad productiva de la (s) especie (s) utilizada (s) en bancos forrajeros, la cantidad de biomasa para la alimentación animal es alta comparada con otro tipo de sistema.

En las áreas del Sistema de Riego Santiago, los bancos de proteína para corte se podrían establecer en parcelas de 50 m² (5 m x 10 m). A fin de reducir los costos del acarreo y facilitar la devolución de las excretas, se instalarían cerca de los sitios donde se suplementará el ganado. Deberían ocupar aproximadamente el 20% del área total de los potreros.

Las especies de árboles, arbustos y herbáceas que constituirán el banco de proteína (sembradas en arreglo espacial de 0,8 m a 1,0 m entre surcos y de 0,25 m a 0,50 m entre plantas) para que el forraje a ser consumido por los animales sea cortado y picado, serán: chilca (*Baccharis latifolia*), Chocho (*Lupinus* sp); y, leucaena (*Leucaena leucocephala*).⁵

Árboles dispersos en los potreros

Constituye el tipo más común de sistema silvopastoril. Consiste en la incorporación de árboles y arbustos distribuidos a lo largo de las pasturas existentes. Generalmente, la función de los árboles y/o arbustos es la de proveer sombra al animal en días calurosos, o refugio en días lluviosos. Además, pueden generar otros productos (forraje, leña, frutos y semillas) y servicios ambientales (fijación de nitrógeno, aporte de materia orgánica, protección, etc) (Ojeda *et al.*, 2003).

Algunos de estos árboles y/o arbustos, son remanentes de los bosques originales antes de la deforestación, otros han sido sembrados por los productores y la mayoría han crecido a partir de la sucesión vegetal natural o por la dispersión que hacen el ganado y los animales silvestres (Murgueitio e Ibrahim, 2004).

Las especies forestales recomendadas para las áreas del Sistema de Riego Santiago son: aliso (*Alnus acuminata*), laurel de cera (*Morella pubescens*), guato (*Erythrina edulis*), fresno (*Fraxinus americana*), acacia negra (*Acacia melanoxylon*), distribuidas en un arreglo espacial de 8 m x 10 m a excepción del fresno que debería plantarse a 10 m x 10 m. Complementariamente, se deberá asegurar una protección individual a cada árbol (especialmente en su estado inicial y juvenil) contra los posibles daños de los animales en pastoreo,

5 Zhofre Aguirre, comunicación personal.

lo cual se puede lograr con la construcción de estructuras en forma de jaulas, compuestas por tres postes y rodeadas con 4 líneas de alambre de púa.⁶

4.1.1.2. Sistema de pastoreo Racional Voisin

Partiendo del principio de que la producción, uso y manejo de los pastos y forrajes son las tareas más importantes del ganadero para disponer de un producto de excelente calidad y en cantidades abundantes para alimentar a sus animales a plena satisfacción; toda vez que, no sólo éstos son el mejor y más importante alimento para los bovinos desde el punto de vista fisiológico y nutricional, sino también el más económico que puede producir y suministrar el productor a fin de lograr mejores resultados tanto en la producción como en la economía del negocio, a continuación se realiza una sistematización de las publicaciones de: Rúa (2009); Rúa (2010); ; Gómez y Rúa (2010); Monteverde (2013); y, Suárez (2017), sobre el Sistema de Pastoreo Racional Voisin (PRV), el mismo que sería pertinente probarlo y validarlo en las pasturas de las áreas del Sistema de Riego Santiago; y, de ser viable, difundirlo a ecosistemas similares, como una opción sostenible del aprovechamiento productivo del suelo, el agua y la vegetación.

El PRV fue propuesto hace poco más de cuatro décadas por el Dr. André Voisin, y ha sido promovido en Latinoamérica por el Dr. Pinheiro Machado, a través de su publicación titulada “Pastoreo Racional Voisin - Tecnología Agropecuaria para el Tercer Milenio”.

El PRV es una técnica que se aplica al manejo de las pasturas de forma tal que el ganadero ejerce un estricto control del pastoreo, movilizándolo de un potrero a otro en el momento justo en que el pasto ha alcanzado su mejor estado nutricional y de productividad en cantidad por área de superficie (Punto Óptimo de Reposo) y en potreros cuya dimensión (área de pastoreo) ha sido calculada para que el ganado no pastoree ni más ni menos de lo que requiere diariamente. Por ende, no hay un estándar en el tamaño de los potreros, ni en los días de rotación (ocupación y descanso), ni en el tamaño del grupo de animales que va al pastoreo, pues todo depende del tipo de pasto o mezcla de pastos que haya en la finca, del clima predominante del momento y de la región, de la vida del suelo (biocenosis) y de su potencial de fertilidad (trofobiosis) del tipo de animales que se manejan (raza, sexo, edad, etc.), entre muchas cosas más.

6 Zhofre Aguirre, comunicación personal

El PRV es la técnica que permite a los ganaderos alojar la mayor carga animal posible en pastoreo en su predio (confinamiento en pastoreo - pastoreo intensivo); pero, al mismo tiempo hace un uso completamente *racional* de las pasturas. Eso significa que en el PRV el ganado no desperdicia pasto, ni lo daña, sino que lo aprovecha al máximo, al tiempo que se respeta el rebrote de la pastura, evitando así su degradación y potencializando su productividad y calidad nutricional.

Se indica que el PRV es idóneo en todo tipo de climas, pisos térmicos y en casi todas las topografías (excepto en suelos de pendiente mayor al 50%), ya que ésta es una técnica que si se lleva a cabo de manera idónea, se ajusta perfectamente a cada caso particular, siendo su fin primordial el de respetar el óptimo estado de recuperación de una pastura para consumirla en su mejor momento y estado de calidad nutricional; entonces, no hay preferencia por una especie de pasto y funciona en todas las épocas del año. También, es ideal cuando se tienen programas de semi - estabulación del ganado.

Al respecto, la semi - estabulación consiste en tener confinados los animales en ciertas horas (de las 7 a.m. a las 12 meridiano, e incluso hasta las 5 p.m.) y brindarles parte de la alimentación en la canoa y el resto la obtienen de los potreros. Este sistema demanda menos cantidad de mano de obra que la estabulación completa; además, el área de los forrajes de corte se reduce y el ganado sale a pastorear a los potreros de pasto mejorado, debidamente divididos en potreros con cerca viva o con cerca eléctrica y un sistema de rotación adecuado.

El PRV es un sistema de pastoreo intensivo, que a más de incluir la cosecha de las pasturas en su punto óptimo, utiliza una mayor carga animal por unidad de superficie, alcanzando una producción de forraje mayor a 20 t ha^{-1} . No se mecanizan los suelos por cuanto éstos no se compactan por el pisoteo de los animales, dado el corto tiempo de su permanencia en cada potrero. No se utilizan fertilizantes químicos para las pasturas, lo que significa una producción orgánica y limpia. Demanda menor requerimiento de riego en época de verano, debido a que el suelo retiene mayor humedad y no se experimenta una caída drástica en la productividad de las pasturas. No se utilizan herbicidas ni insecticidas para el control de las malezas y plagas debido al autocontrol ecológico. Al semi - estabular el ganado la carga supera 10 UGM ha^{-1} (más de

5 000 kg de peso corporal ha⁻¹ de pasto), en forma sostenible y rentable en el corto, mediano y largo plazo.

El PRV es mucho más que rotar potreros. Es hacer un uso inteligente y estratégico (racional) del pasto que se ofrece como alimento al ganado evitando a toda costa que la pastura se deteriore, se degrade, pierda su productividad y/o su calidad nutricional. En otras palabras, es poder garantizar que el pasto del potrero prolongue su existencia sosteniblemente; es decir, que se haga perenne, que perdure para siempre manteniendo en excelentes condiciones su calidad en productividad (cantidad de pasto producido por unidad de superficie) y su oferta nutricional para la producción bovina. Para ello se requiere mover el ganado siempre a los potreros que ofrecen la cantidad y calidad suficientes para que los animales logren su mejor desempeño y expresen su potencial de producción. Así pues, en el PRV el movimiento del ganado se realiza dirigiendo el ganado hacia los potreros que se encuentran en su *Punto Óptimo de Reposo* (POR).

En el PRV los costos de la nutrición del ganado son menores debido a:

- Cosecha de pasturas en su punto óptimo (el mejor estado nutricional).
- Máxima digestibilidad del forraje consumido (menor estado de lignificación).
- Máximo provecho de la oferta forrajera disponible en cada ciclo de rotación.
- Mayor consumo de forraje individual y colectivo en cada potrero.
- Mínimo desplazamiento del ganado (menor gasto energético y trabajo muscular).
- Mínima suplementación nutricional con otras fuentes alimenticias.
- Perfectamente compatible con el suministro de forrajes conservados en la misma finca (caña de azúcar, maíz, sorgo, avena, cebada, centeno, trigo, etc.).

No es entonces una técnica nueva, solo se trata de una técnica subvalorada, pero bastante simple y fácil de ejecutar en cualquier ganadería. La clave está

en perfeccionar el cultivo, uso y mantenimiento de las pasturas y forrajes, los cuales son la base de cualquier ganadería en el mundo. Corresponde a una alternativa ecológica de producción ganadera, que aumenta la productividad por área de superficie desligándose de la dependencia de insumos agroquímicos y agrotóxicos; así como también, de técnicas de agresión al suelo para poder producir, siendo totalmente amigables con el entorno ganadero.

Un principio adicional del pastoreo racional consiste en suministrar a los animales el agua en cada potrero, ubicada de tal forma que todos los individuos del grupo de pastoreo puedan acceder a ella, reduciendo al máximo el efecto de la jerarquía de dominancia. Para esto, se debe garantizar la cantidad y calidad suficiente de agua que permita cubrir los requerimientos de los animales.

El equipo investigador del Instituto André Voisin en la sede de Brasil, ha estudiado con detalle este aspecto; y, los resultados de sus investigaciones han demostrado que en el PRV se produce un 30 a 40% más de carne o leche por hectárea al año, de lo que se produce en cualquier otro manejo pastoril, con solo adoptar la práctica de proveer agua en cada potrero o parcela.

En todo sistema PRV la arborización es un asunto fundamental, así que es necesario combinar el PRV con manejos silvopastoriles, debido a que el éxito rotundo del sistema resulta fundamental que tanto en la cerca viva como al interior de los potreros deba haber vegetación arbórea. Los árboles en el PRV son de suprema importancia ya que proporcionan confort y bienestar al ganado, regulan la temperatura ambiente en cada potrero y filtran la luz solar (rayos UV), sirven como barreras rompe viento, con su desarrollo radicular descompactan los suelos mejorando su estructura, extraen nutrientes de estratos más profundos para ponerlos a disposición de los pastos, sirven como sustento y abrigo para un sinnúmero de especies benignas de microorganismos e insectos que ayudan a mantener el equilibrio, que desplazan o depredan a insectos plagas. Pero, además, generan un ambiente húmedo y fresco a nivel de suelo ya que impiden que la luz solar impacte directamente sobre el mismo; y con esto, evitan que el suelo se deshidrate, lo cual a su vez permite que proliferen microorganismos y así hay una mayor y mejor descomposición de la materia orgánica en la zona radicular, de modo que los suelos se hacen más fértiles naturalmente. Cabe indicar que las especies arbóreas que se podrían probar en el PRV en las áreas del Sistema de Riego Santiago serían las mismas que se anotaron en la descripción del sistema silvopastoril.

En cuanto a los índices productivos comparativamente se menciona, por ejemplo, que las ganaderías ecuatorianas en general manejan una carga promedio nacional de 0,9 cabezas ha⁻¹ (aprox. 0,7 UGG ha⁻¹); mientras que, en el manejo racional del pastoreo, mediante el cual la cosecha del pasto que consume el ganado es sumamente controlada, la carga promedio es de 6,0 UGG ha⁻¹.

Comparativamente, los promedios de productividad de forraje cuando se implementa el método convencional de pastoreo son inferiores a 1 kg m⁻² (10 t ha⁻¹) de forraje verde fresco (FV); en cambio, en un manejo controlado del pastoreo se logra una productividad alrededor de 3 kg m⁻² (30 t ha⁻¹).

En el manejo racional del pastoreo, al dejar de invertir en maquinarias, químicos, venenos y medicamentos, significa un mayor ingreso, ya que la naturaleza se equilibra a sí misma, y con ello, se incrementa la productividad forrajera (puesto que estos pastos se cosechan siempre en el mejor estado de calidad nutricional: no muy jóvenes, no viejos, no lignificados, y por ende con excelente digestibilidad y aporte de nutrientes en su óptimo estado). Por supuesto, esto se traduce en un mejor desempeño del ganado, incrementándose la productividad individual (en cada animal) y del colectivo (en el hato completo). Así, al haber más producto, hay más ventas y por ende mayor ingreso, ampliando la diferencia entre egresos e ingresos, reflejándose esto en una ganadería más rentable.

En cuanto al impacto ambiental, el PRV no solo ha sido pensado y diseñado para darle el mejor manejo a los pastos y para producir más carne, leche y crías en las ganaderías que lo practican, sino que también se ha considerado el impacto que este manejo pudiera tener sobre el ecosistema ganadero, por lo que constituye una práctica ganadera que además de respetar el ambiente, promueve su recuperación, por lo que se la considera como el inicio de la “ganadería racional y orgánica” (nunca se utilizan arados, nunca se aplican fertilizantes sintéticos y tampoco ninguna clase de agro tóxicos: herbicidas, insecticidas). Consecuentemente, el impacto del PRV sobre el ambiente es totalmente positivo y un sinnúmero de beneficios adicionales son atraídos al ganadero, tanto en lo económico como en el aspecto humanitario, al producir carne y leche libres de toda contaminación para garantizar la salud y la calidad de vida de los consumidores.

Si bien el PRV no es una panacea; es decir, no soluciona todos los problemas del ganadero, tampoco es una moda, ni es sólo teoría, es la única manera como

el ganadero puede anular la dependencia de los arados, de los sintéticos, de los agrotóxicos y demás contaminantes ambientales, al tiempo que produce al máximo carne, leche y crías, pero al mínimo costo; entonces, quienes lo promueven afirman con total convicción que es ¡simplemente lo mejor!

4.1.1.3. Carga animal y uso eficiente de los forrajes en la producción lechera

A continuación se anotan algunos referentes en cuanto a la carga animal y al uso eficiente de los forrajes, los mismos que deberían ser observados en procura de asegurar que esta actividad productiva sea económicamente atractiva; y, a la vez, minimizar la degradación del suelo por efecto del sobrepastoreo en las áreas del Sistema de Riego Santiago.

La economía del hato lechero en su mayoría depende de la producción de leche, por lo que, los parámetros que tradicionalmente se miden son la producción/vaca y la carga animal. La idea principal es el incremento de la producción de leche para reducir el impacto de los costos fijos.

La economía productiva genera diferentes reacciones en el productor, siendo una de ellas el incremento de la carga animal, lo cual podría afectar las condiciones físico - químicas del suelo, con la consecuente disminución progresiva de la producción de forraje.

En este contexto, el objetivo del manejo eficiente de los forrajes debe orientarse a optimizar la producción por vaca y por unidad de superficie, sin arriesgar la economía del hato (costo de producción) y sin dañar el suelo (producción sostenible). Ello demanda el uso eficiente de los recursos forrajeros disponibles, en base al conocimiento de la fisiología productiva de las plantas en la perspectiva de minimizar el desperdicio y optimizar la cosecha.

Las estrategias para lograr la mayor conversión del crecimiento en pasto en ingresos monetarios, a través de la producción de leche, contemplan: 1.- el manejo correcto de la fertilidad física y química del suelo; 2.- la selección e introducción de plantas forrajeras adecuadas; 3.- el manejo eficiente de los forrajes disponibles; y, 4.- la selección genética de animales que se adapten al medio productivo pastoril.

El manejo y uso del forraje disponible está ligado al régimen de cosecha, en correspondencia con las diferencias estacionales. La cosecha efectiva demanda

considerar la evolución de la pastura y precisar el momento ideal para la cosecha (pastoreo), lo cual está determinado por la mejor conversión de kilogramos de pasto por kilogramos de leche, con un residuo ideal de pasto de hasta 40%. De allí que es importante establecer un esquema de cosecha en el que se registre: las tasas de crecimiento, entradas, salidas, cantidad cosechada, intervalo en días y el consumo de forraje por vaca. Con esta información se establece el calendario de pastoreo.

Por su parte, los factores que controlan la carga animal son: la cantidad de alimento disponible para cosecha, la demanda nutricional del hato, el nivel de manejo del ganadero, el equilibrio estacional, la disponibilidad/movilidad de los animales, la versatilidad en el manejo de las pasturas, el almacenamiento de excedentes, y el manejo de las reservas forrajeras.

Cabe advertir que, la mayor carga animal no necesariamente significa mayor producción, por lo que es importante saber cuál es la carga óptima. Además, debido a los cambios en las tasas de crecimiento del pasto, la carga animal no es un valor permanente.

En cuanto a la cantidad de alimento disponible es necesario cosechar el forraje en el pico de producción de biomasa, maximizando así la cosecha de nutrientes, lo cual requiere indispensablemente sincronizar la producción con la demanda, a través del manejo del riego y la fertilización.

La demanda nutricional del hato está dada por: 1.- el número de animales y su peso; 2.- el estado productivo - reproductivo; 3.- las metas de producción y de ganancia de peso; y, 4.- la estacionalidad.

El nivel del manejo del ganadero está relacionado con la decisión de éste en cuanto a: la metodología y los calendarios de rotación de los potreros; la identificación de la tasa de crecimiento del pasto; el cálculo de la oferta disponible; la identificación de los cambios en el valor nutricional de la pastura; la identificación de los picos de biomasa; el registro de las estadísticas y los resultados; y, el conocimiento de los factores más influyentes en las tasa de crecimiento de los pastos disponibles.

Respecto a la estacionalidad, por encontrarse el Ecuador en el centro del planeta las estaciones son demarcadas por la cantidad de lluvia; en tanto que, el factor temperatura está gobernado por la altitud sobre el nivel del mar. En

todo caso, la época más limitante es la que fija la carga animal; sin embargo, se pueden mejorar las cargas por medio del almacenamiento de alimento, o podría ser más económico observar la estacionalidad. Estos aspectos deberían ser investigados particularmente en las áreas del Sistema de Riego Santiago.

En cuanto a la disponibilidad/movilidad de animales, si el sistema no es estacional, se podrá aumentar o disminuir el número de animales de acuerdo a la oferta forrajera; en todo caso, será necesario disponer de un lugar donde llevarlos.

La versatilidad en el manejo de las pasturas se refiere a la posibilidad de reajustar el tamaño de los potreros con prontitud, puesto que las tasas de crecimiento son variables. Ello significa que el tamaño del área a pastorearse cada día puede cambiar de acuerdo a la cantidad de pasto disponible y la demanda del hato. De todas formas, es necesario conocer el área de cada potrero para planificar, ejecutar y evaluar su producción.

El almacenamiento de los excedentes es una herramienta obligatoria para poder subir la carga animal en una hacienda (henificación o ensilaje). Lo importante es asegurar que los excedentes estén listos para usarse en cualquier momento que el hato lo necesite.

En resumen, una mayor producción con menor cantidad de pasto es cuestión de calidad y manejo, ello conlleva lo siguiente: 1.- cosechar la mayor producción de alimento digestible posible, evitando el desperdicio; 2.- aprender a conocer las tasas de crecimiento y aprovecharlas a tiempo; 3.- conservar los excedentes y usarlos cuando sea necesario; y, 4.- planificar las demandas de alimento por medio del manejo estacional del hato.

4.1.2. Balance nutricional en sistemas de pastoreo

Debido a la especial importancia que reviste el balance nutricional en los sistemas de pastoreo, en esta sección se realiza una sistematización de la exposición titulada “Máxima Producción de Leche en Pastoreo”, presentada por el Ing. Germán Jaramillo, en el II Seminario Internacional “Factores de Competitividad en la Producción Lechera”, promovido por la Asociación Holstein Friesian Filial de Cuenca (2004), en la que se explica de manera muy concisa los parámetros que se deben evaluar para que una finca ganadera de orientación lechera logre los niveles de producción que sean los más rentables

posibles. Se recalca que los parámetros nutricionales, sin ser los únicos, son los más importantes, por cuanto la alimentación es el factor que, en términos generales, es el que más influye y el de mayor controversia.

Una de las preguntas más frecuente entre los ganaderos y que siempre es tema de discusión es: ¿cuál es la máxima producción de leche que puedo obtener en mi finca?. Este tema es motivo de los más grandes enfrentamientos entre profesionales, ganaderos y hasta países, y la razón la tienen varias personas. Es decir, existen varios sistemas de producción de leche; y, en pastoreo dos específicamente: sistemas suplementados (con consumo de alimentos diferentes a forrajes) y sistemas no suplementados. No todo es tan sencillo como lo anterior, ya que la suplementación tiene sus mínimos y sus máximos, y entre los dos extremos existen muchas opciones, unas mejores, otras no tanto.

Cualquiera que sea el sistema de producción de leche, el principal componente corresponde a los forrajes, ya que sin este elemento constitutivo y característico de la finca, el metabolismo ruminal se verá afectado; y, cualquier modificación que se haga en la cantidad, calidad y/o presentación de esta fibra, repercutirá tanto en la producción como en la salud de los animales.

Los estudios de nutrición recalcan como primera medida que una adecuada nutrición está basada en satisfacer los niveles mínimos de fibra; y que, ésta es la que regula la cantidad máxima de forraje que un animal puede consumir como se anota más adelante.

Por otro lado, los forrajes producidos en la finca son la fuente más económica de nutrientes, ya sea en energía, proteína, minerales, etc. Por lo tanto, su implementación al máximo se justifica económicamente.

En la nutrición de hatos lecheros existe una pirámide nutricional en donde el componente más importante es el forraje, seguido de la suplementación, minerales y aditivos.

Es de notar que el mayor problema nutricional que se presenta en las vacas de alta producción lechera es balancear o suplir la suficiente energía para compensar la descargada en la leche. El factor energético es el más limitante en condiciones generales de hatos bajo sistemas de pastoreo en forrajes de media y alta calidad, debido a que el consumo máximo de forrajes de media y baja

cantidad energética no es suficiente para suplir la elevada demanda energética de la vaca.

4.1.2.1. Consumo de forrajes

En los sistemas de manejo de las fincas ganaderas existe una constante, que a los animales debido a factores de manejo (carga animal y/o productividad ganadera) se les restringe el acceso a los alimentos. Ello significa que el animal solo puede consumir lo que el ganadero le ofrece (x metros cuadrados de pastoreo al día, x kilos de concentrado, x gramos de sal, etc.), por lo que son sistemas basados en la restricción.

Es por lo anterior que el principal y más frecuente problema que presentan los animales es su insatisfactorio consumo de materia seca; entonces, no existe ningún sistema de manejo nutricional que logre funcionar con animales con hambre.

Como el forraje es la principal fuente de materia seca y siendo el objetivo el maximizar el consumo de la misma, lo que maximizará el consumo de nutrientes; y por lo tanto, más salud, más producción, más reproducción, a continuación se analizan los factores que intervienen en el consumo de forrajes en los sistemas de pastoreo.

4.1.2.2. Factores de manejo

Densidad de la pradera (kg m^{-2}).- depende de la altura del forraje, número de hojas, número de tallos. A mayor densidad mayor posibilidad de consumo.

Tiempo real de pastoreo.- horas día de permanencia en el lote.

Altura de pastoreo.- es la altura deseada a la que debe quedar la pradera después de la permanencia de los animales. El forraje consumido es la diferencia entre la altura inicial y la altura de pastoreo. A menor altura de pastoreo disminuye el consumo voluntario, por cuanto el animal debe buscar más y es menos eficiente en cada mordisco (menos g/mordisco).

Oferta de pasto.- kg de pasto ofrecido kg^{-1} de pasto consumido. Esta relación es el arte de un buen pastoreo y debe estar entre 1,5:1 y 2,0:1 (siempre mayor a 1,0). Si se obliga a los animales a bajar la altura de pastoreo (sobrepastoreo), se debe suponer que los animales están soportando hambre y el tiempo de

recuperación de la pradera será mayor; por el contrario, si se deja mucho pasto residual, la calidad del forraje bajará en el siguiente pastoreo ya que habrá mucho material vegetal sobre madurado (alta fibra) y hojas muertas, lo que disminuirá el consumo, dado que los animales no consumirán este forraje, ocasionando hambre.

Materia seca del forraje.- los forrajes muy húmedos ocasionan que el animal tenga que morder muchas veces, pero logra menos materia seca al final, que si pastoreara un forraje con menor contenido de humedad.

Cantidad de suplementación.- el consumo de alimentos distintos a los forrajes genera una tasa de sustitución; es decir, por cada kilo de materia seca de suplementación se reducirá el consumo en kilos de materia seca de forraje. Estas tasas dependen de muchos factores, y se deben calcular y comprobar en cada caso, variando entre 0 a 1; es decir, algunos hatos pueden recibir una suplementación de 1 kg de concentrado y no variar el consumo de forraje, pero en hatos ya suplementados fuertemente y con buena oferta de forraje, 1 kg de concentrado adicional podría llevar a una disminución de 1 kg de MS de forraje.

Tipo de suplementación.- el tipo de alimento diferente al forraje puede influir en el consumo de forraje, ya que elementos como carbohidratos en cantidades calculadas, pueden beneficiar una buena rumia, mejorando la digestión de fibras ocasionando más consumo de forraje; sin embargo, un exceso de carbohidratos deprime el consumo. También, elementos como las grasas y aceites en exceso ocasionan una desmejora en las condiciones ruminales, disminuyendo la digestión de la fibra del forraje y también su consumo.

4.1.2.3. Factores del forraje

El principal factor que afecta el consumo de un determinado forraje es la cantidad de fibra (%) que éste contenga y de su digestibilidad. Existe una teoría llamada "*del hotel*", que significa que un huésped no puede ingresar hasta que otro haya salido; es decir, como la digestión del rumiante procura desdoblar las fibras (procesarlas para sacarle el mayor contenido de nutrientes), entre más contenido de fibra contenga un forraje su permanencia en el rumen de la vaca será mayor, por lo que ésta no podrá ingerir más hasta que lo ya ingerido se digiera.

En los forrajes el contenido de fibra está relacionado con su estado vegetativo, mientras más jóvenes, menos fibra tendrán sus tejidos, menos estructuras como celulosa y hemicelulosa lignificadas y más contenido celular. La digestibilidad depende del grado de lignificación, de la estructura de las fibras y su espesor. La palatabilidad depende de lo agradable al gusto que sea un forraje, lo cual está determinado por factores como suavidad, dulce o amargo, y sustancias tóxicas o antinutricionales.

4.1.2.4. Consumo máximo de forraje

Como se mencionó, el consumo máximo de forraje de una vaca lechera está estrechamente relacionado a la cantidad de fibra que contenga. La siguiente ecuación aproxima lo mejor posible la máxima cantidad de forraje que una vaca en condiciones de pastoreo normal puede consumir:

$$\text{kg MS de forraje (\% PV)} = K/\text{FDNf (\%)}$$

Donde:

kg MS de forraje (%PV): Porcentaje del peso de la vaca que ésta puede consumir en forraje.

PV: peso de la vaca

FDNf (%): fibra detergente neutra del forraje ofrecido.

K: constante de digestión que depende de la digestibilidad del forraje:

100: forrajes de baja digestibilidad, maduros

110: forrajes de media digestibilidad, normales

120: forrajes alta digestibilidad, leguminosas

En el Cuadro 17 se presentan los valores de máximo consumo de forrajes de pastoreo para diferentes valores de los componentes de la ecuación.

Cuadro 17. Máximo consumo de forraje de pastoreo (kgMS día⁻¹)

Peso vaca (kg)	FDNf (%)	kg MS (% PV)		
		K		
		100	110	120
600	55	10,9 (1,8)	12,0 (2,0)	13,1 (2,2)
650	55	11,8 (1,8)	13,0 (2,0)	14,1 (2,2)
600	60	10,0 (1,7)	11,0 (1,8)	12,0 (2,0)
650	60	10,8 (1,7)	11,9 (1,8)	13,0 (2,0)

Los valores del máximo consumo de forraje son los máximos fisiológicos para vacas lecheras, los cuales pueden verse disminuidos por los factores de consumo mencionados anteriormente.

Al respecto, en muestreos de campo realizados en más de 20 fincas de buen manejo, se encontró un máximo de consumo en forrajes de 12 kg de MS y una media de 10,5 kg de MS.

El primer objetivo de un ganadero debe ser suministrar a satisfacción el requerimiento de materia seca del animal, dado que la única forma de elevar la producción de leche es incrementando el consumo de materia seca. En sistemas de pastoreo donde el forraje es el nutriente más barato, se debe tratar de que el consumo de éste sea el máximo. No es el hecho de comer más forraje por sí mismo, ni de aumentar el consumo de fibras en sí, sino de proporcionar la mayor cantidad de nutrientes. Consecuentemente, la principal herramienta con que cuenta el ganadero para incrementar la producción de leche de sus vacas es la de ofrecer la suficiente cantidad de forraje de tal forma que ésta satisfaga sus necesidades y que el forraje contenga el menor porcentaje de fibra, para que sea más digerible, más energético y pueda ser consumido en mayor cantidad, logrando una mayor producción de leche por la vaca. Al cumplir este primer objetivo se podrá pensar en balancear una ración.

Todo animal que acceda a una nutrición suficiente y balanceada, producirá más, será más sano y se reproducirá mejor, *el sueño de todo ganadero*.

El Cuadro 18 contiene los valores de las características nutricionales de algunos de los forrajes comunes de la zona del Sistema de Riego Santiago.

Cuadro 18. Características nutricionales de algunos forrajes comunes en la zona

FORRAJE	FDN (%)	ENL [Mcal (kg MS)-1]	PC (%)
Kikuyo	40 - 75 (60)	1.1 - 1,55 (1,35)	15 - 32
Ryegrass	40 - 75 (55)	1.1 - 1,65 (1,40)	16 - 35
Maíz	35 - 70 (52)	1.2 - 1,70 (1,40)	9 - 25

4.1.2.5. Consumo total de materia seca

Las ecuaciones que predicen el consumo total de materia seca (MS) de vacas lecheras están relacionadas por los siguientes factores ordenados de mayor a menor importancia:

- Peso del animal
- Días en lactancia
- Tiempo de gestación
- Humedad de la ración
- Temperatura ambiental
- Grasa en la ración
- Factores de manejo: competencia, oferta.

La fórmula más general de la producción de leche esperada, o real (en términos de leche estandarizada al 4% de grasa) es:

$$\text{kg MS} = (0,018 * \text{peso vaca}) + (0,305 * \text{leche kg [corregida al 4\%]}) \text{ NRC 2000}$$

Corrección al 4%

$$\text{LCG 4\%} = (\text{kg leche} * 0,4) (\text{kg grasa} * 15)$$

En el Cuadro 19 se anotan los valores del consumo necesario de materia seca (kg día⁻¹) para diferentes niveles de producción de leche

Cuadro 19. Consumo necesario de materia seca (kg día⁻¹) para diferentes niveles de producción de leche

Peso vaca kg	Producción de leche (4% de grasa)			
	0	15,0	25,0	35,0
550	9,9	14,5	17,5	20,6
600	10,8	15,4	18,4	21,5
650	11,7	16,3	19,3	22,4

Es notable en el sistema de producción bajo pastoreo, la significativa diferencia entre el máximo consumo posible de materia seca proveniente del forraje (Cuadro 17) y la materia seca requerida (Cuadro 19), para alcanzar producciones medias o altas, por lo que la *suplementación se convierte más que una opción en una necesidad*.

4.1.2.6. Consumo mínimo de forrajes

Como la fibra presente en los forrajes es la encargada de estimular la rumia y las contracciones ruminales que garantizan la salud del animal, estos forrajes deben tener un mínimo de inclusión en la dieta, que como regla general obedecen a las recomendaciones que se presentan en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Consumo mínimo de FDN proveniente del forraje

%PV en FDNf	Tipo de dieta
0,75	dieta alta en subproductos fibrosos
0,85	dieta promedio con inclusiones promedio concentrado
0,95	dieta alta en concentrados

Ejemplo:

Una vaca de 600 kg de peso vivo, con suplementación promedio de +/- 5 kg día⁻¹, consumiendo forraje con 55% de fibra detergente neutra (%FDN) y 17% de materia seca (MS).

Forraje mínimo 0,85 % de su peso en FDN del forraje

$$600 * 0,85/100 = 5,1 \text{ kg de FDNf}$$

¿Cuántos kg de forraje de 55% de FDN?

$$5,1 \text{ kg de FDN}/0,55 = 9,3 \text{ kg de materia seca de forraje}$$

$$9,3/0,17 = 54,7 \text{ kg de forraje verde}$$

En términos generales, se puede decir que una vaca con alta inclusión de concentrados debería comer mínimo 9,3 kg de MS de forrajes para asegurar su salud.

4.1.2.7. Capacidad de carga de la finca

Conociendo, por un lado, que a partir de las características del forraje (en particular su contenido de FDN), una vaca puede consumir un máximo y debe consumir un mínimo dependiendo del nivel de suplementación; y, por otro, el volumen o capacidad de producción anual de forrajes en el área destinada a animales adultos o vacas en ordeño, se deducirá cuál es su capacidad máxima de carga, cuánto es el máximo que se puede suplementar y qué niveles de producción alcanzará con dicha suplementación.

4.1.2.7.1. Aforo de praderas

La producción de una pradera dedicada al pastoreo por unidad de área, es la diferencia entre la cantidad (kg) obtenida del corte de 1 m² de pradera a nivel

del suelo y la cantidad obtenida en el mismo sector del pasto remanente o que dejaron las vacas, la primera medida se llama oferta de forraje, y la diferencia es el consumo expresado en kg m^{-2} ó t ha^{-1} .

4.1.2.7.2. Frecuencia de pastoreo

Son los días que transcurren en promedio entre un pastoreo y otro (50 - 70 días), con este dato se obtiene el número promedio de pastoreos anuales.

4.1.2.7.3. Volumen de forraje producido

El volumen de forraje producido resulta del promedio de los aforos de la pradera y el número de pastoreos/año. Si en la finca se identifican dos o más sectores con forrajes distintos o con características productivas diferentes, se deben diferenciar correctamente.

4.1.2.7.4. Calidad del forraje

Es necesario que un ganadero conozca las características nutricionales medias de sus forrajes, enviando muestras de éste a los laboratorios especializados en análisis bromatológicos, con el fin de conocer parámetros mínimos, tales como: proteína cruda, fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA), minerales básicos (Ca, P, K, etc.). Estas muestras en lo posible deben representar las calidades medias del forraje anualmente producido, o tener parámetros de estacionalidad, o alta y baja calidad, o sector a y sector b. También, es indispensable tomar muestras para determinar el contenido de materia seca (MS) de los forrajes ofrecidos de manera de calcular la producción anual en materia seca (MS).

En el Cuadro 21 se presenta el cálculo del inventario forrajero para una finca de 55 ha constituida por ocho lotes de pastoreo.

Cuadro 21. Cálculo del inventario forrajero de una finca de 55 ha de pastoreo

Lote No.	Área	Aforo	Pastoreos	Producción	MS	Producción	FDN	Producción
	ha	t ha ⁻¹	año	t ha ⁻¹ año ⁻¹	%	t MS año ⁻¹	%	t año ⁻¹
1 - 3 - 5	25	10	7	70	16	280	55	154
2 - 6	10	8,3	6	50	16	80	60	48
4 - 8	20	8,6	7	60	17	204	65	133
Total	55					564		335

La finca de 55 ha de pastoreo produce 564 t de MS en el forraje al año, con un porcentaje promedio de fibra de: $FDN = 335/564 = 59,0 \%$.

Debido a que entre el 10 al 15 % del forraje producido se debe dejar de excedente para superar problemas climáticos y períodos de renovación de praderas, la disponibilidad de MS será: $564,0 * 0,9 = 507,6 \text{ t año}^{-1}$.

Si se considera que el consumo de un forraje de 59,0% de FDN por una vaca de 600 kg es de máximo 12 kg MS día⁻¹, se tiene:

$$507,6/365 * 1000 = 1\ 390 \text{ kg MS día}^{-1}$$

1 390 kg /día /12 kg /vaca = 115 vacas adultas en 55 ha de pastoreo: 95 en ordeño y 20 secas.

La energía promedio de un forraje de 59% de FDN es 1,35 Mcal kg⁻¹ MS (Cuadro 17), ello alcanzaría para producir con vacas de 600 kg tan solo 10 - 11 kilos de leche día por vaca o 1 050 kilos de leche finca⁻¹ día⁻¹.

El mínimo forraje que se debe suministrar si se suplementa es de 0,85% PV

$$600 * 0,85/100 = 5,1 \text{ kg de FDN}$$

$$5,1 \text{ kg FDN}/59 \% \text{ FDN} = 8,6 \text{ kg MS de forraje}$$

Entonces, el número máximo de vacas para satisfacer la fibra mínima necesaria al hacer suplementación de concentrados es:

1 390 kg/día /8,6 kg MS vaca/día = 161 vacas adultas en 55 ha de pastoreo: 130 en ordeño y 31 secas.

En el Cuadro 22 se presenta los valores de las recomendaciones generales de los contenidos óptimos FDN y de proteína en la dieta para un rango de producción de leche 15 a 40 kg día⁻¹.

Cuadro 22. Contenidos óptimos de FDN y de proteína (PC) en la dieta

Leche	Óptimo	PC
Kg día ⁻¹	FDN %	%
No lactante	60	13 - 14
<15	50	14 - 15

Leche	Óptimo	PC
15 - 20	45	15 - 16
20 - 30	40	16 - 17
30 - 40	35	17 - 18
> 40	30	18 - 19

4.1.2.8. Suplementación de vacas en pastoreo

La situación real es que vacas pastoreando forrajes de media y baja calidad en promedio y con problemas de oferta, debidos a malos manejos de los sistemas de pastoreo y/o sobrecarga animal en las fincas, son en el mejor de los casos capaces de alcanzar un promedio de producción de 11 kg día⁻¹ de leche, con máximos al inicio de la lactancia de 20 a 24 kg apoyándose en las reservas corporales, y un mínimo al final de la lactancia de 5 - 8 kg día⁻¹ de leche.

Es por tal motivo que la suplementación se merece el apelativo de “*es un mal necesario*”. Sería la ilusión de todos poder tener hatos que producen un promedio de 15 litros sin suplementación como lo hacen en Nueva Zelanda, pero los forrajes de ellos en promedio son mucho mejores que los de la zona de estudio.

Nuestra genética en la mayoría de las fincas tiene el potencial de constituir hatos con promedios de 25 a 28 litros vaca⁻¹ día⁻¹, pero la única forma de lograr esos niveles de producción es suplementando a las vacas con alimentos balanceados altamente energéticos y alto contenido de proteína, ya sea utilizando materias primas de primera calidad (maíz molido, soya, semilla de algodón, tortas de oleaginosas, harina de pescado, grasas de sobrepaso, etc.) y/o subproductos de la industria alimentaria (afrechos de cerveza, papa, cáscaras de frutas, etc.). También, se puede recurrir a la compra de concentrados comerciales.

La suplementación ofrece las siguientes premisas: la respuesta marginal; es decir, cuántos kg de leche se incrementarán al introducir 1,0 kg de suplementación, es variable, y va de 0 a 2,4 kg de leche kg⁻¹ de suplemento:

- 0 kg de leche kg⁻¹ de suplemento: para vacas de baja producción, final de lactancia y consumiendo forrajes de altísima calidad y oferta abundante (nunca es nuestro caso).

- 2,4 kg de leche kg^{-1} de suplemento: para vacas en lactancia temprana consumiendo forrajes de media y baja calidad, con ofertas restringidas.

Al suplementar hatos lecheros, la proteína de la leche se ve incrementada de 0,1 a 0,2%, debido al incremento de la densidad energética de la ración.

En general, al incrementar la calidad de los forrajes ofrecidos a las vacas, se incrementa la proteína cruda en una proporción mayor que la energía, y se ocasionan desbalances importantes que los suplementos los equilibran. Es esta deficiencia de energía, la principal limitación en la producción de leche por parte de la vaca.

Las características fisiológicas, peso, reproducción, salud, etc., generalmente se ven beneficiadas.

El consumo de suplementos ocasiona una tasa de sustitución en el consumo de forraje; es decir, al consumir 1 kg de suplemento, el consumo de forraje puede ser reducido en proporciones que van de 0 a 1 dependiendo también del nivel de oferta del forraje.

Al implementar sustituciones se debe evaluar económica y fisiológicamente el beneficio de la inclusión de 1 kg de suplemento. Si la respuesta económica, utilidad marginal, no es tal que lo producido en unidades monetarias (\$) sea mayor que lo suplementado en (\$) y el beneficio fisiológico no es lo suficiente para justificar la suplementación, entonces la misma es innecesaria.

4.1.3. Métodos probados de renovación de potreros

La producción de forraje de alta calidad (pasturas o potreros) y el mejoramiento de la regulación hídrica de los terrenos arcillosos en las áreas del Sistema de Riego Santiago, demandan un correcto manejo de la estructura del suelo, la gestión de la fertilidad, la composición botánica de la pradera, y el método y época de aprovechamiento de la misma.

En el contexto enunciado, el objetivo final es producir la mayor cantidad de materia seca de alta calidad nutritiva por unidad de superficie; entendiéndose por ello, praderas con baja fibra detergente neutra (FDN) y niveles óptimos de proteína, energía y fibra.

En el uso del suelo con pasto en el área de Salapa, se determinó que existe problemas de compactación del suelo debido al permanente e intenso pisoteo de los animales, a lo cual se suma la presencia de praderas envejecidas y mal manejadas de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), es oportuno recuperar como lecciones aprendidas la experiencia acumulada por ganaderos progresistas y visionarios de la zona, quienes entendiendo la complejidad climática y edáfica en la que desarrollan su actividad productiva, disponen de valiosas experiencias para disponer de praderas de alta calidad, técnica, económica y ambientalmente viables.

Desde el punto de vista de la renovación y manejo eficiente de las praderas, se han desarrollado dos aproximaciones, fruto de la experiencia productiva. La primera, corresponde al manejo del kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), perteneciente a los pastos de fotosíntesis C4, que es el más común y extendido en la zona; y, la segunda, la utilización de pastos de mejor calidad nutricional: ryegrass (*Lolium multiflorum*), pasto azul (*Dactylis glomerata*), de fotosíntesis C3; y, leguminosas como el trébol (*Trifolium repens*).

Es pertinente mencionar que los pastos de fotosíntesis C4 se caracterizan por un bajo punto de compensación de CO₂ atmosférico, un rápido crecimiento, bajas tasas de foto respiración y de pérdida de agua por unidad de materia producida, un alto intervalo óptimo de temperatura, un alto punto de saturación lumínica; y; una anatomía foliar en corona; en tanto que, los pastos de fotosíntesis C3, presentan un alto punto de compensación de CO₂ atmosférico, altas tasas de foto-respiración, un intervalo óptimo de temperatura de 10 - 25 °C, y un punto de saturación lumínica mucho menor que las plantas C4. La fotosíntesis en las plantas C4 no está afectada por altas o bajas concentraciones de O₂ atmosférico, mientras que la fotosíntesis en las C3 es inhibida por altas concentraciones de O₂ y aumenta a bajas concentraciones de éste. Bajo condiciones de riego, las plantas C4 son capaces de competir con las C3 debido a su alta eficiencia en el uso del agua (Boom *et al.*, 2011).

4.1.3.1. Renovación de praderas

En primer lugar, se debe hacer un corte de igualación de la pradera, que puede ser mecánico (moto - guadaña o segadora); o, animal, haciendo pastorear caballos, animales menores (ovejas) o ganado ocioso (vacas secas, vaconas, terneros, etc.). Es importante que el residuo (altura de pasto) no sea mayor a 5 cm. A continuación, se procede a pasar un renovador de praderas (Figura

19), que con sus discos corta los estolones y los tallos rastreros del kikuyo, estimulando los meristemas y yemas, los mismos que a posteriori generarán estructuras vegetales de crecimiento vertical. En la parte posterior del renovador de praderas, se dispone de cinceles que penetran en el suelo hasta una profundidad de 15 cm, los cuales rompen la capa compactada, actividad que permite incrementar la infiltración, mejorar el drenaje y oxigenar el suelo.

Muchos ganaderos aprovechan los microsurcos para regar a chorro continuo semillas de ryegrass y/o trébol (manual o mecánicamente), mejorando sustancialmente la calidad de la pradera. Posteriormente, en base a la disponibilidad de nutrientes (análisis de suelos) y a los requerimientos del pasto, es necesario realizar una eficiente campaña de fertilización; de igual manera, es necesario mantener el suelo, a través de riego por aspersion, a contenidos de humedad a capacidad de campo.

La pradera renovada estará lista para el pastoreo de las vacas lecheras, al cabo de 30 o 45 días, siempre y cuando el kikuyo haya alcanzado 4 a 5 hojas nuevas (altura de la bota: 25 cm) (Mancino, 2015).



Figura 19. Renovador de praderas

4.1.3.2. Reemplazo de praderas

Con el objetivo de reemplazar la pradera envejecida de kikuyo por un pasto de mejor calidad, inicialmente, se procede a quemar la misma con aplicación de herbicidas sistémicos y de contacto (Figura 20), tanto para hoja ancha como angosta (glifosato, 2 - 4D, etc.).



Figura 20. Aplicación de herbicida con la fumigadora.

Posteriormente, se pasa el descompactador de potreros (Figura 21), que dispone de varios cinceles espaciados entre 60 a 70 cm (dependiendo del modelo), los cuales penetran hasta una profundidad de 25 a 30 cm.



Figura 21. Descompactador de potreros

Seguidamente, se remueve el suelo utilizando un rotavator (Figura 22) o una rastra de discos en tándem (Figura 23), con la finalidad de mullir los primeros 5 a 10 cm del suelo en donde se anidará la semilla de la mezcla forrajera seleccionada (ryegrass y trébol). Es necesario aplicar en este momento fertilizantes fosforados. Finalmente, se procede a tapar la semilla utilizando el mismo implemento o una rastra de ramas.



Figura 22. Rotavator Maschio



Figura 23. Rastra de discos en tándem

A continuación, a través del riego, hay que mantener el suelo a un contenido de humedad alrededor de capacidad de campo. Cuando el pasto inicie el proceso

de macollamiento (21 días), se aplican los macro y micro elementos necesarios reportados en el análisis de suelos o identificados en pruebas de evaluación biológica de la fertilidad. Dependiendo de las condiciones climáticas, la pradera estará lista para su consumo entre 50 a 60 días (Figura 24). (Mancino, 2015)



Figura 24. Potrero renovado en el área de Salapa

4.1.4. Prácticas de manejo y conservación del suelo

4.1.4.1. Fertilización

En las áreas del Sistema de Riego Santiago, resultaría muy importante promover la fertilización orgánica de los pastos. Ésta protege y mejora la salud del agro ecosistema, la biodiversidad y la actividad microbiológica del suelo, para la gestión sostenida de la fertilidad del suelo.

La aplicación de abonos orgánicos es necesaria para mejorar la estructura del suelo e incrementar su capacidad de retención de nutrientes liberándolos lentamente a medida que la planta los necesite. La utilización en el establecimiento de pasturas (potrero) es necesaria para mejorar el nivel de nutrición de los pastos y obtener una buena producción.

La mejora de las características físicas del suelo se traduce en un aumento de la capacidad de retención de humedad, el mejoramiento de la aireación, la

agregación de las partículas, la reducción de la susceptibilidad a la erosión y el incremento de la conductividad hidráulica. El mejoramiento de las propiedades químicas incluye el suministro de elementos esenciales para las plantas, el incremento de las reservas nutricionales del suelo y el mantenimiento uniforme de la reacción en el suelo.

En este contexto, una de las prácticas fundamentales en la zona es la dispersión de heces del ganado inmediatamente después del pastoreo, lo cual permitiría un reciclaje uniforme de los nutrientes y la eliminación de parásitos, con lo que se lograría mejor desarrollo y mayor producción del pasto; además, de alguna manera se reduciría la eutroficación del agua en las partes bajas de las microcuencas, por efecto de la carga de fósforo de las heces del ganado.

Cabe indicar que como fertilización orgánica, en la actualidad los productores en la zona, utilizan la aplicación de las plumas provenientes de los camales de pollos de la ciudad de Loja, con impresionantes resultados en el desarrollo de los pastos. Esto constituye un importante tema de investigación.

Considerando los muy bajos niveles de nitrógeno y fósforo en estos suelos, complementariamente a la aplicación de abonos orgánicos, después de cada pastoreo se debería aplicar fertilizantes que contengan los referidos elementos, incluyendo el boro. En todo caso, para precisar los elementos deficitarios y las cantidades requeridas, se recomienda realizar la evaluación biológica de la fertilidad de los suelos de las áreas del Sistema de Riego Santiago, utilizando el método de invernadero desarrollado por Colwell (1980) y adaptado por Valarezo (1985) en la Universidad Nacional de Loja para las condiciones locales, el mismo que ha sido probado exitosamente en varias investigaciones realizadas en diferentes suelos del país. Se utiliza el tomate como planta indicadora y en ocho semanas se detectan con mucha precisión los elementos deficientes.

4.1.4.2. Aplicación de sulfato de calcio

El sulfato de calcio (yeso) debe ayudar a romper el suelo compactado; además, mejora la tasa de infiltración y también la conductividad hidráulica. Complementariamente, el yeso proporciona el calcio, por una parte que se necesita para flocular las arcillas en el suelo con la concomitante formación de agregados estables; y, por otra, que requieren los animales para su crecimiento y para una elevada producción de leche.

4.1.4.3. Encalado del suelo

La acidez del suelo se corrige con la aplicación de carbonato de calcio (cal agrícola). La cantidad y frecuencia de aplicación de este corrector depende principalmente del cultivo, el pH del suelo, la acidez intercambiable, la textura, el contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de saturación de bases.

Cuando los suelos tienen un pH menor de 5,5 son calificados como ácidos; por lo tanto, en los terrenos correspondientes a los perfiles P6Z y P5Z del área de estudio, que tienen pH de 5,1 y 5,3 en su orden, hay que adicionar cal con aplicaciones entre 6 y 8 t ha⁻¹. El carbonato de calcio en el suelo genera dos efectos; por un lado, al hidrolizarse el ion carbonato produce iones OH⁻ los cuales neutralizan los iones H⁺; y, por otro, al igual que en el caso del yeso, el calcio flocula las arcillas y es un nutriente esencial para el pasto y los animales.

4.1.4.4. Prácticas mecánicas de conservación de suelos

Entre las prácticas mecánicas de conservación de suelos más importantes recomendadas para las pasturas de las áreas del Sistema de Riego Santiago se anotan las siguientes:

- Zanjas de drenaje: con el propósito de menguar el efecto de las aguas de escorrentía proveniente de las áreas superiores.
- Zanjas de infiltración: en curvas de nivel para promover una mayor retención del agua en el suelo, en cuyo diseño se deberá considerar el tipo de suelo y el régimen de lluvias.
- Canales de desviación: cuya función es interceptar el agua de escorrentía y conducirla a las vías de agua naturales de las fincas.

4.1.5. Optimización del uso del agua de riego

Como ya fue mencionado, PREDESUR, en 1984 promovió la construcción de reservorios en depresiones naturales e instaló la tubería principal y las respectivas derivaciones y acometidas en el área de Salapa, estableciendo como condición que el agua de riego se aplique por presión, aprovechando la carga hidráulica que se genera del desnivel entre los reservorios y las áreas de riego. Es por esta razón que todos los usuarios utilizan aspersores para regar los pastos.

Sin embargo, luego de la construcción de la infraestructura hidráulica indicada y la integración del área regada al canal principal del Sistema de Riego Santiago, los productores no han tenido el acompañamiento técnico necesario en cuanto al diseño de riego parcelario a presión. En virtud de lo indicado, con la finalidad de disminuir la escorrentía, la erosión y la saturación del suelo, es pertinente promover un uso y manejo racional del agua y el suelo, a través de un adecuado diseño agronómico e hidráulico, que responda a las características biofísicas y socio organizativas de las diferentes zonas que conforman el Sistema de Riego Santiago.

4.2. Uso del suelo con hortalizas

La producción intensiva de hortalizas (principalmente de brócoli) que cubre aproximadamente el 3% del área dedicada a la producción agropecuaria de Salapa, cuyo mercado seguro es la ciudad de Loja, es el segundo rubro productivo de importancia social y económica, el mismo que está a cargo de pequeños productores, lo que conlleva la generación de trabajo campesino familiar.

No obstante que la producción de hortalizas se la realiza en pequeñas extensiones, las cuales se riegan con micro aspersión y goteo, subsisten problemas de manejo del suelo y el agua, especialmente procesos erosivos que, como ya se ha demostrado en los capítulos anteriores, han llevado a la pérdida casi completa del horizonte A del suelo.

4.2.1. Manejo y conservación del suelo

En cuanto al manejo y conservación del suelo se recomienda incluir las siguientes prácticas:

- Zanjas de drenaje: con el propósito de menguar el efecto de las aguas de escorrentía proveniente de las áreas superiores.
- Zanjas de infiltración: en curvas de nivel para promover una mayor retención del agua en el suelo, en cuyo diseño se deberá considerar el tipo de suelo y el régimen de lluvias.
- Canales de desviación: cuya función es interceptar el agua de escorrentía y conducirla a las vías de agua naturales de las fincas.

- Sembrar los cultivos hortícolas siguiendo las curvas de nivel.
- Aplicar labranza mínima.
- Incrementar el contenido de materia orgánica en el suelo, especialmente a través de la utilización de los residuos orgánicos para la elaboración de bioles y compost. También, en la zona actualmente es común en la producción hortícola el uso de las plumas de las aves provenientes de los camales de la ciudad de Loja.
- Aplicar carbonato de calcio en los suelos más ácidos y sulfato de calcio en aquellos de pH mayor a 5,5.
- Implementar barreras vivas en curvas de nivel, con especies tales como: yerba luisa (*Aloysia citrodora*), achira (*Canna indica* L.), agave (*Agave tequilana*), etc.

4.2.2. Optimización del uso del agua de riego

Al igual que en el caso de los pastos, debido a que los agricultores no fueron capacitados sobre la técnica del riego presurizado y el manejo de los suelos, a fin de optimizar el uso del agua de riego, se anotan las siguientes recomendaciones:

- La intensidad de precipitación del riego parcelario por microaspersión no deberá exceder al valor de la infiltración básica. Con ello se evitaría la pérdida de agua por escorrentía en los terrenos inclinados y la erosión; así como, el anegamiento del suelo en las partes planas, cuyo resultado es la falta de oxígeno en la zona radicular lo cual afecta al desarrollo del cultivo, y los deslizamientos en masa de las partes inferiores.
- Tanto en las hortalizas como en los pastos, se deberá regar cuando se haya consumido el 50% del agua aprovechable en la zona de las raíces, y se deberá regar hasta alcanzar la capacidad de campo, sin saturar los macroporos del suelo (capacidad de aireación), de manera que las raíces puedan respirar.
- En el compromiso de dar respuesta a los interrogantes de: ¿cuánto?, ¿cuándo? y ¿hasta cuándo? regar en los diferentes suelos estudiados, se deberían realizar investigaciones en las que se consideren entre otros aspectos: las características físicas, químicas y biológicas de los suelos, y

sus propiedades hidrodinámicas, las necesidades de agua de los cultivos, la profundidad radicular, la carga hidráulica disponible, la velocidad y dirección del viento; y, el caudal asignado.

- La información generada en la investigación deberá ser traducida al método visual y del tacto, de manera de familiarizar a los productores sobre la apariencia del suelo en relación a la lámina a aplicar, cuándo y hasta cuando regar.
- También, se debería aprovechar la experiencia acumulada por algunos agricultores innovadores, quienes para iniciar el riego consideran principalmente el aspecto de la planta y el contenido de humedad del suelo al tacto, bajo la advertencia de no regar en exceso.
- En cuanto al cultivo de brócoli, García (2015) en un experimento realizado en el área de Salapa, reporta que manteniendo la tensión de humedad del suelo en un rango de 12 a 20 KPa, los rendimientos entre el tratamiento con aplicación de $1,45 \text{ t ha}^{-1}$ de cal y el testigo (sin cal), fueron de 49 200 y 34 000 kg ha^{-1} , respectivamente.



Figura 25. Asamblea General de Usuarios del Sistema de Riego Santiago

5. Bibliografía

- Abu-Hamdeh, N. (2003). Compaction and Subsoiling Effects on Corn Growth and Soil Bulk Density. https://www.researchgate.net/publication/250129156_
- Achim, E., Smith, R., Cuevas, B. y Dorner, J. (2000). Effect of moisture and transit frequency on stress distribution on different soils. http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0304-88022000000200008&script=sci_arttext
- Ago, H., y Kessler, A. (1996). El enfoque de planificación participativa para enfrentar la degradación de la tierra en América Latina. <http://cia.corantioquia.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=3112#>
- Aguilar, J. (2014). Efecto de tres sistemas de labranza en la conductividad hidráulica, densidad aparente y porosidad de un suelo franco-arcilloso. Recuperado de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1872/40033%20AGUILAR%20ZAVALA,%20JOSE%20JUAN%20%20TESIS.pdf?sequence=1>
- Alameda, D. (2010). Ecophysiological implications of soil compaction on plant development. <http://www.irnase.csic.es/users/interbos/Resultados/Tesis%20David%20Alameda.pdf>
- Albán, A. (2009). Índice preliminar de compactación y propiedades hidrológicas en suelos cálcicos bajo caña de azúcar (*saccharum officinarum*). <http://www.bdigital.unal.edu.co/3674/1/7006501.2009.pdf>

- Alonso, J. (2011). Los sistemas silvopastoriles y su contribución al medio ambiente. <http://www.ica.inf.cu/revista-cubana-de-ciencia-agricola/articulos/T45-N2-A2011-P107-J-Alonso.pdf>
- Amézquita, E., y Chávez, L. (1999). La compactación del suelo y sus efectos en la productividad de los suelos. http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:V4EHGXdTsi0J:www.ibrarian.net/navon/paper/Edgar_Am_zquita_C_2_y_Luis_F__Ch_vez_O__3.pdf%3Fpaperid%3D21918035+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=ec
- Arriaga, F., Luck, B., y Siemering, G. (2018). Managing soil compaction at planting and harvest. <https://dodge.uwex.edu/files/2018/10/A4158-Managing-Soil-Compaction.pdf>
- Andrades, M., y Martínez, M. (2014). Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. Tercera Edición. Universidad de La Rioja. España. : <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/267902.pdf>
- Anfinnsen, B., Aguilar, M., y Vatn, A. (2009). Actitudes de los productores ganaderos de El Peten, Guatemala, respecto a la implementación de sistemas silvopastoriles. <https://www.norlarnet.uio.no/pdf/featured-research/english/agroforesteria.pdf>
- Angella, G., Frias, C., y Salgado, R. (2016). Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta. https://www.researchgate.net/publication/322888562_Conceptos_basicos_de_las_relaciones_agua-suelo-planta
- Ansari, S., y Deshmukh, R. (2017). Estimation of Soil Moisture Content. https://www.ripublication.com/ijtam17/ijtamv12n3_18.pdf
- Arronis, V. (2007). Recomendaciones sobre sistemas intensivos de producción de carne: estabulación, semiestabulación y suplementación estratégica en pastoreo. http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_animal/estabulacion.pdf
- Arshad, M., y Martin, S. (2002). Identifying critical limits for silquality indicators in agroecosystems. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/573/57311561003.pdf>

- Asmamaw, L., y Mohammed, A. (2012). Effects of slope gradient and changes in land use/cover on selected soil physic biochemical properties of the Gerado catchment, north eastern Etiopia. <http://www.tandfonline.com/loi/genv20>.
- Bamutaze, Y., Makooma, M., Jackson, M., y Vanacker, V. (2009). Infiltration characteristics of volcanic sloping soils on Mt Elgon. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816209001817>
- Baker, A. (2014). Soil Compaction and Agricultural Production. http://iworx5.webxtra.net/~istroorg/download/Nigeria_conf2014_downloads/SWE/2%20Baker.pdf
- Bashour, I. (2011). Soil chemistry and soil fertility. Facultad of agricultural and food sciences. American University of Beirut. : <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C12/E1-05-07-06.pdf>
- Bastidas, C., y Coronel, O. (2014). Caracterización de los principales movimientos de masa presentes en el barrio Zalapa, perteneciente al cantón Loja, provincia de Loja. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Bast, L., Warncke, D., y Christenson, D. (2011). Facts About Soil Acidity and Lime Questions and Answers. http://www.canr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/facts_about_soil_e1566.pdf
- Barreto, F., Carvallo, H., y Gheyi, H. (2003). Conductividad hidráulica en un suelo aluvial en respuesta al porcentaje de sodio intercambiable. <http://www.scielo.br/pdf/%0D/rbeaa/v7n2/v7n2a37.pdf>
- Barreto, H., y Gámez, A. (2017). Determinación del límite líquido y plástico para un suelo caolín amarillo usando el penetrómetro de cono de caída con diferentes modelos de cono. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15499/1/Informe%20de%20grado%20-%20Angie%20Gamez%20y%20Jhonatan%20Leal%20FINAL.pdf>
- Bernal, N., Montealegre, G., Nola, S. y Ramírez L. (2003). Efecto de cuatro métodos de labranza sobre las propiedades físicas y la pérdida de suelo, en la rotación papa-pastos en un ecosistema húmedo alto andino de Colombia. <https://docplayer.es/27153624>

- Bitelli, M. (2011). Measuring Soil Water Content. <https://journals.ashs.org/horttech/view/journals/horttech/21/3/article-p293.xml>
- Bitelli, M. (2010). Measuring Soil Water Potential for Water Management in Agriculture. <https://www.mdpi.com/2071-1050/2/5/1226/htm>
- Boom, A., Mora, A., y Cleef, H. (2011). High altitude C4 grasslands in the northern Andes: relicts from glacial condition. *Palaebotany and Palinology*, 115.
- Borelli, P., y Oliva, G. (2005). Efectos de los animales sobre los pastizales. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-capitulotme_4.pdf
- Bretschneider, G., y Salado, E. (2010). Sistemas de producción lecheros, no es cuestión de encerrar vacas y chau: hay que analizar bien todo. http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_bovina_de_leche/produccion_bovina_leche/158-encerrar_vacas.pdf
- Burley, J., y Speedy, A. (1998). Investigación Agroforestal: perspectivas globales. Instituto Forestal de Oxford. : <http://www.fao.org/livestock/agap/frg/agrofor1/Burley2.htm>
- Buytaert, W., Wyseure, G., Deb Bi, B., y Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. <http://paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/HP.pdf>
- Bronick y Lal. (2004). Soil structure and management. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.5938&rep=rep1&type=pdf>
- Calamita, G., Brocca, L., Perrone, A., Piscitelli, S., Lapenna, V., Melone, E., y Moramarco, T. (2012). Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. https://www.researchgate.net/publication/229186910_Electrical_resistivity_and_TDR_methods_for_soil_moisture_estimation_in_central_Italy_test-sites
- Cartes, M., y Vargas, X. (2007). Módulo: Balance Hídrico en un Lisímetro de Drenaje. http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/M%F3dulo_Balance_H%EDdrico.pdf

- Chavarria, G., y Pessoa dos Santos, H. (2012). Plant Water Relations: Absorption, Transport and Control Mechanisms. <http://www.intechopen.com/books/advances-in-selected-plantphysiology-aspects/plant-water-relations-absorption-transport-and-control-mechanisms>
- Ceballos, A., Martínez, J., Hernández Santana, V., Morán, C., y Casado, S. (2005). Variabilidad espacio-temporal de la humedad del suelo en el sector semiárido de la Cuenca del Duero (España). [http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol19_3_4/Cuaternario%2019\(3-4\)\(04\)Ceballo.pdf](http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol19_3_4/Cuaternario%2019(3-4)(04)Ceballo.pdf)
- Coder, K. (2000). Soil Compaction & Trees: Causes, Symptoms & Effects https://www.extension.iastate.edu/forestry/publications/pdf_files/for00-003.pdf
- Chaudhari, P., Ahire, D., Ahire, V., Chkravarty, M., y Maity, S. (2013). Soil Bulk Density as related to Soil Texture, Organic Matter Content and available total Nutrients of Coimbatore Soil. <http://www.ijsrp.org/research-paper-0213/ijsrp-p1439.pdf>
- Chakraborty, K., y Mistri, B. (2017). Estimation of Soil Compaction from Bulk Density and its Effect on Crop Production. <https://www.researchgate.net/publication/319939892>
- Coello, C., De Bièvre, B., Pacheco, E., y Cisneros, P. (2007). Análisis de métodos de estimación de la conductividad hidráulica saturada en suelos degradados. Recuperado de http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2007/ecuador2007/8_Coello.pdf.
- Cuesta, P., Echeverría, M., Cajas, S., Martínez, J., y Sánchez, C. (2005). Procesos tecnológicos para la renovación de praderas degradadas en las regiones Caribe y valles interandinos. <https://es.scribd.com/document/216118528>
- Cuevas, J., Seguel, O., Ellies, A., y Dörner, J. (2006). Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencia a la adición de lodos urbanos. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v6n2/art01.pdf>

- Datta, S., Taghvaeian, S., y Stivers, J. (2017). Understanding soil water content and thresholds for irrigation management. <https://www.researchgate.net/publication/317501722>
- Dane, J., y Hopmans, J. (2010). Water retention and storage. California: University of California. : <http://hopmans.lawr.ucdavis.edu/papers-ppt-zip/Chapt3-3-1&21.pdf>
- Daza, M.,Hernández, F., y Alba, F. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz – Colombia. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v67n1/v67n1a06.pdf>
- Deb, S., y Shukla, M. (2012). Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. <https://thescipub.com/pdf/10.3844/ajessp.2012.489.502>
- Denoia, J., Sosa, O., Zerpa, G., y Martín, Y. (2010). Efecto del pisoteo animal sobre la velocidad de infiltración y sobre otras propiedades físicas del suelo. <http://polired.upm.es/index.php/pastos/article/viewFile/1278/1282>.
- Dexter, A. (1998). Advances in characterization of soil structure. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167198788900025>
- De la Orden, E., Quiroga, A., Ribera, D., y Morláns, M. (2006). Efecto del sobrepastoreo en un pastizal de altura. Cumbres de Humaya. Catamarca. Argentina. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54015315>
- Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., y Hussain, S. (2012). A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. <https://www.researchgate.net/publication/256756413>
- Douglas, M., Mughogho, S., Saka, A., Shaxson, T., y Evers, A. (1999). An investigation into the presence of a cultivation hoe pan under smallholder farming conditions. http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i33989_001.pdf
- Donado, G. (2004). Modelo de conductividad hidráulica en suelos. Bogotá: Universidad de Bogotá. [http://www.docentes.unal.edu.co/lddonadog/docs/Grade_Docs/Donado_\(2004\).pdf](http://www.docentes.unal.edu.co/lddonadog/docs/Grade_Docs/Donado_(2004).pdf)

- Dorigo, W., Gruber, A., Van Oevelen, P., Wagner, W., Drusch, M., Mecklenburg, S., Robock, A., y Jackson, T. (2011). The International Soil Moisture Network - An observational network for soil moisture product validations Obtenido de <https://www.isprs.org/PROCEEDINGS/2011/ISRSE-34/211104015Final00819.pdf>
- Duiker, W. (2005). Efectos de la compactación del suelo. <https://extension.psu.edu/effects-of-soil-compactation>
- Easton, Z., y Bock, E. (2016). Soil and Soil Water Relationships. https://ext.vt.edu/content/dam/ext_vt_edu/topics/agriculture/water/documents/Soil-and-Soil-Water-Relationships.pdf
- Echavarria, F., Serna, A., y Bañuelos, R. (2007). Influencia del sistema de pastoreo con pequeños rumiantes en un agostadero del semiárido Zacatecano. <http://cienciaspecuarias.inifap.gob.mx/index.php/Pecuarias/article/view/1777>
- Ellies, A., Grez, R., y Ramírez, C. (1997). La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. Universidad Austral de Chile. <https://es.scribd.com/document/258210899/La-Conductividad-Hidraulica-en-Fase-Saturada>
- Enciso, J., Porter, D., y Périès, X. (2005). Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego. <https://aglifesciences.tamu.edu/baen/wp-content/uploads/sites/24/2017/01/E-618S-Irrigation-Monitoring-with-Soil-Water-Sensors.-Spanish-Version.pdf>
- Evett, S. (2008). Neutron moisture meters. https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/tcs-30_web.pdf
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2009). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. <http://www.fao.org/docrep/012/i0680s/i0680s.pdf>
- Fallas, R. (2006). Proyecto de desarrollo sostenible de la producción agropecuaria en cantones de Acosta y Aserri: componente ganadería estabulada y semiestabulada. http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_animal/estabulacion.pdf

- Fenollar, D. (2017). Análisis de los parámetros del suelo utilizando sensores aplicado a una parcela experimental. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/89165/FENOLLAR%20-%20An%C3%A1lisis%20de%20los%20par%C3%A1metros%20del%20suelo%20utilizando%20sensores%20aplicado%20a%20una%20parcela%20experi....pdf?sequence=1>
- Fernández, L., Buyolo, T., y Cabezas, J. (2006). Efectos del pastoreo en clima mediterráneo árido sobre propiedades físicas del suelo. IV Región de Chile.
- Ferrándiz, J. (2017). Methods to determine soil moisture content. <http://dspace.umh.es/jspui/bitstream/11000/4187/1/TFG%20Ferr%C3%A1ndiz%20Molina%2C%20Jos%C3%A9.pdf>
- Ferrero, A. (1991). Effect of compaction simulating cattle trampling on soil physical characteristics in woodland. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016719879190099J>
- Forsythe, W., Sancho, F., y Villatoro, M. (2006). Efecto de la compactación de suelos sobre el rendimiento del maíz en tres localidades de Costa Rica. http://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n03_175.pdf
- Fuchsberger, J., y Kirchengast, G. (2013). Deriving Soil Moisture from Matric Potential in the Wegener Net Climate Station Network. Austria: University of Graz Austria. http://www.wegener.net/misc/WegenerNet_TechNote-SoilMoisture.pdf
- Fuentes, J. (2003). Técnicas de Riego. Cuarta Edición. Ediciones Mundi Prensa. Madrid-Epaña
- Fuentes, J., y García, G. (1999). Técnicas de riego. Sistemas de riego en la agricultura. México.
- Flores, L., y Alcalá, R. (2010). Laboratorio de Física de Suelos. <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>

- Flores, B., Ferrer, J., y Florentino, A. (2011). Cambios en las propiedades físicas del suelo bajo diferentes usos en la subcuenca Callecitas del río "El Castrero". <https://www.researchgate.net/publication/307209888>
- Gabriels, D., Lobo, D., y Pulido, M. (2011). Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. Universidad de Gante Bélgica. <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:yXc0XHklXwgJ:citeweb.info/20111857508+&cd=21&hl=es&ct=clnk&gl=ec>
- Gálvez, J. (2016). Identificación de parámetros de calidad del suelo bajo dos sistemas de producción ganadera. http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2872/Galvez_Gonzalez_Jhonny_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- García, A. (2008). La materia orgánica y su papel en lucha contra la degradación del suelo. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.
- García, F. (2015). El desarrollo de la producción agropecuaria bajo riego y el manejo del agua, el suelo y los cultivos en la zona de riego de Salapa. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- García-Sinovas, D., Regalado, C., Muñoz-Carpena, R., y Álvarez, J. (2010). Comparación de los parámetros de Guelph y Philip - Dunne para la estimación de la conductividad hidráulica saturada del suelo. Recuperado de http://www.abe.ufl.edu/Faculty/carpena/files/pdf/zona_no_saturada/temas_de_investigacion_v5/9.pdf.
- Guevara, E y Márquez, A. (2012). Parametrización de modelos de infiltración basada en pruebas de campo en suelos agrícolas de la cuenca del río Chirgua, Venezuela. <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2009/fs/BP17rev.pdf>
- Ghisolfi, E. (2011). Contenidos de materia orgánica. Relación con la fertilidad del suelo en siembra directa. Primera Edición. Argentina.
- Glab, T. (2011). Effect o Soil Compaction on Root System Morphology and Productivity of Alfalfa (Medicago satival). Instituto of Machinery Exploitation, Ergonomics and Produccion Processes. : <http://www.pjoes.com/pdf/20.6/Pol.J. Environ. Stud. Vol.20.No.6.1473-1480.pdf>

- Gómez, K. (2011). Incidencia de la compactación ocasionada por el tractor en las propiedades físicas en un andisol. <http://www.bdigital.unal.edu.co/6417/1/822133.2011.pdf>
- González, J. (2017). Análisis y modelado de sensores de reflectometría en frecuencia para medida de agua en el suelo. <http://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/6084/tfm-gon-ana.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Geissert, D., y Barois, I. (2012). Qué importancia tiene conocer la acidez del suelo. http://proyectos.inecol.edu.mx/redcafesustentable/downloads/Despacho_27_06_SACAF_acidez_suelo_FINAL.pdf
- Giménez, D., Kluchinski, D., Murphy, S., y Muldowny, L. (2010). Assessment of Soil Disturbance on Farmland. <https://www.nj.gov/agriculture/sadc/farmpreserve/postpres/rutgerssoildisturbancereport.pdf>
- Gómez, M., y Rúa, M. (2010). Una experiencia de campo con PRV en Ecuador. <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/experiencia-de-campo-con-prv-en-ecuador-t28672.htm>
- González, J. (2018). Zonificación agroecológica y plan del uso del suelo para la zona de riego del Sistema Santiago. Tesis Ingeniero Agrícola. Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional de Loja. Ecuador
- Gonzalez, K. (2018). Sistemas de pastoreo utilizados en la ganadería. <https://zoovetespasion.com/pastos-y-forrajes/sistemas-de-pastoreo/>
- Goulding, K. (2016). Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5032897>
- Gutiérrez-Gnecchi, J., Reyes, E., Téllez, A., Méndez, A., y Fregoso, L. (2018). Validation of Wireless Volumetric Soil Water Content Sensor Based on Soil Temperature and Impedance Measurements. https://www.ijntr.org/download_data/IJNTR04010015.pdf

- Hamza, M., y Anderson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causas y possible solutions. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198704001849>
- Haghnazari, F., Shahgholi, H., y Feizi, M. (2015). Factors affecting the infiltration of agricultural soils. <https://pdfs.semanticscholar.org/1263/7df77243763c7499bad3e843905b31e03835.pdf>
- Hakansson, I. (2005). Compaction of arable soils. <https://core.ac.uk/download/pdf/84053047.pdf>
- Hettiaratchi, D., Gross, M., Harris, J., Nye, O., y Smith, K. (2007). Soil compaction and plant root growth. *Philosophical Transactions*. https://www.jstor.org/stable/76838?seq=1#page_scan_tab_contents
- Hillel, D. (2004). *Introduction to Environmental Soil Physics*. <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id...assetKey=AS...>
- Hignett, C., y Evett, S. (2002). Neutron thermalization. <https://www.researchgate.net/publication/286676335>
- Horn, R., Domzwał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A., y Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016719879500479C>
- Ibrahim, M., y Aliyu, J. (2016). Comparison of methods for saturated hydraulic conductivity determination: field, laboratory and empirical measurements. http://www.journalrepository.org/media/journals/BJAST_5/2016/Mar/Ibrahim1532016BJAST24413.pdf
- Ilaco (International Land Development Consultants of the Netherlands). (1981). *Agricultural Compendium. For Rural Development in the Tropics and Subtropics*.
- Jaramillo, G. (2004). *II Seminario sobre Factores de Competitividad en la Producción Lechera*. Cuenca. Ecuador

- Jarvis, N., Koestel, J., Messing, I., Moeys, J., y Lindah, A. (2013). Influence of soil, land use and climatic factors on the hydraulic conductivity of soil. <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/5185/2013/hess-17-5185-2013.pdf>
- Jiménez, C., Rosas, G., y Falla, R. (2012). Efecto de la ganadería en las propiedades físicas del suelo de Lomerío en el Centro de Investigaciones Amazónicas Macagual. <http://www.udla.edu.co/revistas/index.php/ingenierias-y-amazonia/article/view/99/42-50>
- Jordán, A. (2010). Manual de Edafología. Sevilla: Universidad de Sevilla. Departamento de cristalografía, mineralogía y química agrícola. : <http://libnet.unse.edu.ar/1bi/ba/cefaya/cdig/000005.pdf>
- Kaur, K., Mahajan, R., y Bagai, D. (2016). Various Soil Moisture Measurement Techniques. http://www.ijirset.com/upload/2016/april/92_25_A%20Review.pdf
- Keller, T. (2004). Soil compaction and soil tillage studies in agricultural soil mechanics. Doctoral thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.424.9835&rep=rep1&type=pdf>
- Keller, T., Lamande', M., Peth, S., Berli, M., Delenne, Y., Baumgarten, W., Rabbel, W., Radja, F., Rajchenbach, J., Selvadurai, A., y Or, D. (2012). An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. https://www.researchgate.net/publication/251572016_An_interdisciplinary_approach_towards_improved_understanding_of_soil_deformation_during_compaction
- Kirkham, M. (2014). Principles of soil and plant water relations. Segunda Edición. Estados Unidos: Universidad de Kansas.
- Kok, H., Taylor, R., Lamond, R., y Kessen, S. (1996). Soil Compaction. Problems and Solutions. <https://www.bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/AF115.pdf>
- Kulkarni, S., Bajwa, S., y Huitink, G. (2010). Investigation of the effects of soil compaction in cotton. <https://www.researchgate.net/publication/283311470>

- Kumar, C., y Mitt, S. (2007). Soil moisture retention characteristics and hydraulic conductivity for different areas in India in selected states. : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.570.5963&rep=rep1&type=pdf>
- Lagunas, A. (2013). Evaluación del manejo del riego por medio de sensores de humedad del suelo en un cultivo de tomate para industria. <http://academica.unavarra.es/bitstream/handle/2454/7165/578022.pdf?sequence=1>
- Lal, R., y Shukla, M. (2004). Principles of Soil Physics. Ohio: The Ohio State University.
- Landini, A., Martínez, D., Días, H., Soza, E., Agne, D., y Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v25n2/v25n2a03.pdf>
- Lanfranco, J., Pellegrini, A., y Cattani, V. (2014). Contenidos de edafología. Génesis, evolución y propiedades físico-químicas del suelo. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Argentina
- Lee, D., Reynolds, W., Elrick, D., y Clothier, B. (1985). A comparison of three field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdfplus/10.4141/cjss85-060>
- León, J. (2006). Conocimiento local y razonamiento agroecológico para toma de decisiones en pasturas degradadas en El Peten Guatemala. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0741e/A0741e.pdf>
- Libreros, H. (2015). Sistemas silvopastoriles: opción para la mitigación y adecuación al cambio climático en bosque seco tropical. <http://www.semillas.org.co/es/sistemas-silvopastoriles-opci>
- Lomeling, D., y Mori, D. (2015). Spatial Patterns of Penetration Resistance and Soil Moisture Distribution in a Sandy Loam Soil (Eutric leptosol). https://scialert.net/fulltextmobile/?doi=ijss.2015.130.141#155134_ja

- Luccerini, S., Suboysky, E., y Borodowski, E. (2012). *Sistemas Silvopastoriles*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. https://www.agro.uba.ar/apuntes/no_8/sistemas.htm
- Luna, D., Sánchez, C., y Muñoz, J. (2005). Métodos para medir la conductividad hidráulica en el campo. www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/download/1040/644
- Macías, J., Vargas, A., y Arellano, F. (2018). Hydraulic Conductivity in two sites of the Central Valley of Costa Rica: comparative analysis of three methodologies of testing in the vadose zone. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rgac/n59/0256-7024-rgac-59-71.pdf>
- Machecha, L. (2002). El silvopastoreo: una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/rccp/article/view/323817/20781003>
- Mancino, M. (2015). *Propuesta de manejo de potreros para las ganaderías de la hoya de Loja - Ecuador*.
- McKenzie, R. (2010). *Agricultural Soil Compaction: Causes and Management*. [https://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex13331/\\$file/510-1.pdf?OpenElement](https://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex13331/$file/510-1.pdf?OpenElement)
- Marín, G. (2011). *Sistemas de producción animal I. . .* : https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4782/sistemas_produccion_animal_i.pdf
- Martín, E. (2017). Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego. https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1220s-017_0.pdf
- Mărunțelu, I. y Rus, F. (2017). Determining the soil compaction degree by measuring the penetration resistance. http://aspekt.unitbv.ro/jspui/bitstream/123456789/2217/1/43-47_Maruntelu_I_2.pdf
- Martino, D. (2012). *Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa*. <http://www.cultivares.uy/siembra/martino.pdf>

- Martínez de Azagra, A., Pando, V., Del Rio, J., y Navarro, J. (2006). Aproximación al conocimiento de la infiltración a través del análisis dimensional. http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_REPN%2FECO_2006_20_471_492.pdf
- Martínez, D., Landini, A., Soza, E., Sainato, C., y Heredia, O. (2010). Efecto del pisoteo animal sobre las propiedades de un suelo. parte II: infiltración y conductividad hidráulica saturada. <http://www.agrociencia.cl/images/revistas/2011/Efecto%20pisoteo%20animal%20en%20propiedades%20del%20suelo%20II.pdf>
- Martínez, P. (2007). Descripción y evaluación económica de los sistemas de producción: Pastoreo, semiestabulado y estabulado en una muestra de fincas lecheras asociadas a Dos Pinos de la zona Norte. Costa Rica. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/463/1/AGN-2007-T013.pdf>
- Medina, C., Camacho-Tamayo, J., y Cortés, C. (2012). Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162012000100010
- Medina, C. (2016). Efectos de la compactación de suelos por el pisoteo de animales, en la productividad de los suelos. <https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/recia/article/download/229/270/>
- Medvedev, V. (2009). Soil penetration resistance and penetrographs in studies of tillage technologies. <https://link.springer.com/article/10.1134/S1064229309030077>
- Méndez, J. (2008). Manual de recomendaciones para el manejo sostenible de la ganadería bovina de carne en la Region Chorotega. : <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00148.pdf>
- Meneses, R., y López, J. (2007). Sistema de pastoreo. <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/IPA/NR07636.pdf>
- Mwendera, E., y Saleem, M. (1997). Hydrologic response to cattle grazing in the Ethiopian highlands. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880996011279>

- Montanari, R., Casarin, E., Rodrigues, A., Pereira, D., Carvalho, M., y Dalchiavon, F. (2012). Physical attributes of an Oxisol linear and spatially correlated with millet + pigeonpea intercropping. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-737X2012000100018&lng=pt&tlng=pt
- Monteith, J., y Unsworth, M. (2013). Principles of Environmental Physics. Plants, Animals, and the Atmosphere. Cuarta Edición. <http://denning.atmos.colostate.edu/readings/Monteith.and.Unsworth.4thEd.pdf>
- Monteverde, S. (2013). Fundamentos del Pastoreo Racional Voisin. <https://www.researchgate.net/publication/328791610>
- Mohanty, R., Kanwar, S., y Everts, C. (1994). Comparison of Saturated Hydraulic Conductivity Measurement Methods for a Glacial-Till Soil. https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf_pubs/P1434.pdf
- Mohsenipour, M., y Shahid, S. (2016). Estimation of saturated hydraulic conductivity. https://www.researchgate.net/publication/308261851_ESTIMATION_OF_SATURATED_HYDRAULIC_CONDUCTIVITY_A_REVIEW
- Morgan, R., McIntyre, K., Vickers, W., Quinton, J., y Rickson, R. (1997). A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0933363097000135>
- Mora, M., Ríos, L., Ríos, L., y Almario, J. (2017). Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia. https://www.researchgate.net/publication/323192934_Impacto_de_la_actividad_ganadera_sobre_el_suelo_en_Colombia/download
- Murgueito, E. (2003). Impacto ambiental de la ganadería de leche en Colombia y alternativas de solución. <http://lrrd.cipav.org.co/lrrd15/10/murg1510.htm>
- Muñoz-Carpena, R. (2004). Field Devices for Monitoring Soil Water Content. <https://www.researchgate.net/publication/238619241>

- Muñoz-Carpena, R., Shukla, S., y Morgan, K. (2012). Field Devices for Monitoring Soil Water Content. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.514.6862&rep=rep1&type=pdf>
- Murgueitio, E., y Ibrahim, M. (2004). Ganadería y medio ambiente en América Latina. http://www.avpa.ula.ve/congresos/memorias_xiicongreso/pdfs/11_conferencias/11_conferencia_murgueitio_pag187-202.pdf
- Nair, R., Kumar, B., y Nair, V. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. https://www.researchgate.net/profile/B_Mohan_Kumar/publication/229921719_Agroforestry_as_a_strategy_for_carbon_sequestration/links/02e7e53638ab2c6d26000000/Agroforestry-as-a-strategy-for-carbon-sequestration.pdf
- Navarro, G., y Navarro, S. (2013). Química Agrícola. Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas. Tercera Edición. Ediciones Mundi Prensa.
- Navas, A. (2010). Importancia de los sistemas silvopastoriles en la reducción del estrés calórico en sistemas de producción ganadera tropical. www.scielo.org.co/pdf/rmv/n19/n19a10
- Nawaz, M., Bourrié, G., y Trolard, F. (2012). Soil compaction impact and modeling. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01201344/document>
- Neris, J., Jiménez, C., Fuentes, J., Morilla, G., y Tejedor, M. (2012). La vegetación y uso del suelo efectos sobre las propiedades del suelo y la infiltración del agua de Andisoles en Tenerife. www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-62847791-6c6d-34a9-b71a-ea900191d2be
- Nguyen, M., Sheath, G., Smith, C., y Cooper, A. (1998). Impact of cattle treading on hill land: Soil physical properties and contaminant runoff. [://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00288233.1998.9513312?needAccess=true](http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00288233.1998.9513312?needAccess=true)
- Natural Resources Conservation Service. (NRCS) (2001). Rangeland Soil Quality-Compaction. https://extension.illinois.edu/soil/sq_info/RSQIS4.pdf

- Ojeda, P., Restrepo, J., Villada, D., y Cesáreo, J. (2003). Sistemas Silvospastoriles, una opción para el manejo sustentable de la ganadería. http://www.agronet.gov.co/www/docs_si2/2006102417332_Sistemas%20silvospastoriles%20sustentable%20ganaderia.pdf
- Oosterbaan, R., y Nijland, H. (1994). Determining the saturated hydraulic conductivity. <http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.694.8962&rep=rep1&type=pdf>
- Orellana, T. (2010). Validación de los métodos de laboratorio para la determinación de la capacidad de retención de agua en suelos. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/746/1/ti836.pdf>
- Orosco, M. (2010). Banco de proteínas. <http://miguelorozcof1.blogspot.com/2010/06/bancos-de-proteinas.html>
- Orrego, X. (2007). Manejo de agua en frutales. <http://bibliotecadigital.fia.cl/bitstream/handle/20.500.11944/2010/8RiegoAFC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Petropoulos, G., Griffiths, H., Dorigo, W., Xaver, A., y Gruber, A. (2013). Surface Soil Moisture Estimation: Significance, Controls, and Conventional Measurement Techniques. <https://www.researchgate.net/publication/259398354>
- Pérez, C. (2012). Índice de plasticidad del suelo. <https://es.scribd.com/doc/109431839/indice-de-plasticidad-del-suelo>
- Pfeiffer, M. (2008). Comparación de dos métodos de campo y uno de laboratorios para la medición de conductividad hidráulica saturada en el suelo. Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/101693/pfeiffer_m.pdf?sequence=6&isAllowed=y
- Phogat, V., Toamr, V., y Dahiya, R. (2015). Soil Physical Properties. https://www.researchgate.net/publication/297737054_Soil_Physical_Properties/download
- Porta, J., López, M., y Poch, R. (2014). Edafología. Uso y protección de suelos. Tercera Edición. España: Mundi Prensa.

- Porta, J., López-Acevedo, M., y Roquero, C. (2008). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. España: Mundi Prens.
- Pumphrey, E., Klepper, B., Rickman, R., y Hane, D. (1980). Sandy Soil and Soil Compaction. <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/wp988k05k>
- Pulido, M. (2014). Indicadores de calidad del suelo en áreas de pastoreo. http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/1621/TDUEX_2014_Pulido_Fernandez.pdf?sequence=1
- PREDESUR. (Subcomisión Ecuatoriana del Programa de Desarrollo del Sur). (1975). Estudio de Factibilidad del Proyecto de Riego Santiago. Loja-Ecuador
- Prieto, B., Tamara, R., y Peroza, J. (2006). Comparación de dos métodos de campo para la determinación de la conductividad hidráulica saturada en suelos del Sinu (Córdoba, Colombia). <http://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/643>
- Prichard, T. (2013). Soil moisture measurement technology. <http://cecentralsierra.ucanr.org/files/96233.pdf>
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., y Célliri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. https://www.researchgate.net/publication/260389572_
- Ramírez, R., y Salazar, C. (2010). Cambios de la resistencia a la penetración en un suelo con diferentes sistemas de manejo y su relación con algunas propiedades físicas en un andisol-Marínilla la Montañita. https://issuu.com/comunicacione/docs/cambios_de_la_resistencia_a_la_pene
- Ramírez, R., Caremona, A., y Pérez, G. (2010). Cambios en la conductividad hidráulica y su relación con otras variables físicas de un andisol, bajo diferentes sistemas de manejo en el Municipio de Marínilla-Antioquía Colombia. www.unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/rramirez/cambios_en_la_conductividad_hidraulica_y_su_relacion_con_otras_variables_fisicas_de_un_andisol_bajo_diferentes_sistemas_de_manejo_en_el_municipio_de_marinilla_antioquia_.pdf

- Rivera, J. (2003). La labranza de los suelos en el trópico: ¿necesidad o costumbre?. http://www.oocities.org/biotropico_andino/cap4.pdf
- Rivera, L., Goyal, M., y Crespo M. (2004). Métodos para medir la humedad del suelo. <https://es.slideshare.net/suelos09/met-p-medir-humedad-del-suelo>
- Rodríguez, R., y Rodríguez, J. (2011). Métodos de análisis de suelos y plantas. Criterios de Interpretación.
- Robinson, D., Jones, S., Wraith, J., Or, D., y Friedman, S. (2003). A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.522.5214&rep=rep1&type=pdf>
- Rogers, D., Aguilar, J., Kisekka, I., Barnes, P., Lamm, F. (2014). Soil, Water, and Plant Relationships. <https://www.ksre.k-state.edu/irrigate/reports/L904.pdf>
- Rosas, V. (2011). Evaluación del potencial productivo de tres cultivares de Zanahoria (*Daucus carota* L.) en Valdivia. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/far789e/doc/far789e.pdf>
- Rúa, M. (2009). Las leyes universales de André Voisin para el pastoreo racional. http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/115-Voisin.pdf
- Rúa, M. (2010). Beneficios del pastoreo racional voisin. http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/122-voisin.pdf
- Rubio, A. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural Los Alcornocales. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf>
- Ruiz, F. y Gz-Jamica, H. (2012). Efectos ambientales y socio-económicos del sistema de producción ganadero con enfoque ambientalmente sostenible y el sistema tradicional, implementados en las fincas Escocia y Alejandría, respectivamente en el municipio de Montería, departamento de Córdoba. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/2505/RuizSoleraFlorAngela2012.pdf>

- Ruiz, M. (2007). Los sistemas silvopastoriles: un enfoque necesario de investigación y vinculación de la UACH en el Trópico Húmedo. www.crupy-uach.org.mx/.../415430abffd4f0a21d720cbbec6abe1c.doc
- SAGARPA. (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural Pesca y Alimentación). (2010). Establecimiento y manejo de bancos de proteína. www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Establecimiento%20y%20manejo%20de%20bancos%20de%20prote%C3%ADna.pdf
- Salgado, L. (2010). Determinación de las características hidrodinámicas del suelo. Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad de Concepción. <https://es.scribd.com/document/226221616/Caracteristicas-Hidrodinamicas-Del-Suelo>
- Sandoval, M., Ulloa, L., Quezada, C., Arumí, J., Capulín, J., y Celis, J. (2012). Evaluación de la conductividad hidráulica saturada mediante permeámetro guelph y mini-disk infiltrómetro en un (alfisol) cultivado con cero labranza. <http://www.agren.cl/schcs/boletines/21b/files/assets/downloads/page0088.pdf>
- Santa Olalla, F., López, P., y Calera, A. Agua y Agronomía. (2005). Universidad de Castilla- La Mancha. Ediciones Mundi - Prensa. España.
- Sarki, A., Saffar, M., Asghar, A., Muhammad, S., y Latif, A. (2014). Determination of Saturated Hydraulic Conductivity of Different Soil Texture Materials Obtenio de <https://pdfs.semanticscholar.org/23cc/df56d0dca656c22a84d509e90c89865550bd.pdf>
- Sasal, C., Castiglioni, M., Ferrerio, J., y Wilson, M. (2009). Propiedades hidrológicas edáficas bajo diferentes secuencias de cultivos en siembra directa. <http://congress.cimne.com/zns09/admin/files/filepaper/p351.pdf>
- SENAGUA. (Secretaría Nacional del Agua) (2011). Proyecto de Riego Santiago. Loja-Ecuador
- Schaetzl, R., y Anderson, S. (2009). Soils Genesis and Morphology Cambridge University Press. New York: Cambridge University Press. Third Printing.

- Sierra, H., Basurto, M., Robles, L., Pérez, R., y González, C. (2011). La relación agua-suelo en la agricultura. Chihuahua - México.
- Silva, C., Silva, H., Garrido, M., y Acevedo, E. (2015). Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos. Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas.
- Smith, R., y Warrick, A. (2007). Soil water relationships. https://www.researchgate.net/publication/43265020_Soil_water_relationships/download
- Smith, J., Hilbert, J., y Aucaná, M. (2005). Clasificación de vehículos en función del grado de compactación ejercida sobre suelo agrícola. <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=inta2.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=038255>
- Soracco, G. (2003). Relación entre la conductividad hidráulica saturada y la densidad aparente en tres situaciones de manejo contrastantes. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
- Suárez, D. (2017). Pastoreo Racional Voisin, la salvación de tu ganadería. <https://www.ganaderiaregenerativa.com/post/2017/03/03/pastoreo-racional-voisin-la-salvaci%C3%B3n-de-tu-ganader%C3%ADa>
- Stiegler, J. (2012). Soil Compaction and Crusts. <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Rendition-5080/unknown>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., y Rosales, M. (2009). Livestock's Long Shadow. : <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/a0701s/a0701s00.pdf>
- Stepniewski, W., Gliniski, J., y Ball, B. (1994). *Effects of compaction on soil aeration properties*. Amsterdam: Elsevier.
- Stibinger, J. (2014). *Examples of Determining the Hydraulic Conductivity of Soils*
- Theory and Applications of Selected Basic Methods. http://envimod.fzp.ujep.cz/sites/default/files/skripta/16e_final_tisk.pdf

- Taboada, M. (2007). Efectos del pisoteo y pastoreo animal sobre suelos en siembra directa. Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, Argentina. : www.produccion-animal.com.ar/suelos_ganaderos/49-efectos_pisoteo.pdf
- Tarjuelo, J. (2005). El riego por aspersión y su Tecnología. Terecre Edición. Ediciones Mundi - Prensa. España
- Tiwari, K., y Raghuwanshi, N. (2014). Irrigation Engineering. <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=124839>
- Towhid, K. (2013). Physical Properties of Forest Soils. <http://www.springer.com/978-3-319-02540-7>
- Tokunaga, A. (2006). Effects of bulk density and soil strength on the growth of blue wildrye (*Elymus glaucus* buckl). http://humboldt-dspace.calstate.edu/bitstream/handle/2148/77/allisontokunaga_thesis.pdf?sequence=1
- Tuller, M., y Or, D. (2005). Water retention and characteristic curve. https://www.researchgate.net/publication/251875388_Water_retention_and_characteristic_curve/download
- USDA. (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) (1999). Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. New York: Segunda Edición.
- USDA. (United States Department of Agriculture). (2017). Soil Survey Manual. <https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Llibre50.pdf>
- Usón, A., Boixadera, J., Bosch, A., y Martín, A. (2010). Tecnología de suelos. Primera Edición. España.
- Valarezo, L. (1997). Desarrollo Agrícola y Diseños de Riego (Goteo, Aspersión, Microaspersión, Gravedad) en las Granjas Garza Real del Cantón Zapotillo y Salapa del Cantón Loja. Estudio de Consultoría. Subcomisión Ecuatoriana-PREDESUR. Loja-Ecuador

- Valarezo, C., Iñiguez, M., Valarezo, L., y Guaya, P. (1998). Condiciones físicas de los suelos de la región sur del Ecuador, una guía para proyectos de riego, drenaje, manejo y conservación de suelos. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Valarezo, C. (2011). Física de Suelos. Manejo de la Palama Aceitera. Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Valarezo, C. (2012). El suelo como recurso básico para el crecimiento de las plantas: Elementos sobre génesis, mineralogía, características físico-químicas y fertilidad. Loja: Universidad Nacional de Loja. Area Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables.
- Valipour, M. (2014). Soil Water Constants. Irrigation Engineering. <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=124843>
- Valle, S., Martínez, E., Silva, P., y Acevedo, E. (2011). Efecto de la labranza cero en el crecimiento radical del trigo (*Triticum turgidum* L.). <http://www.agren.cl/schcs/boletines/20/files/assets/downloads/page0159.pdf>
- Vanags, C., Minasny, B., y McBratney, A. (2004). The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical. <https://www.researchgate.net/publication/237557382>
- Varón, V. (2016). Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo (CAM) y su Incidencia en su capacidad productiva. <http://bdigital.unal.edu.co/55892/13/vivianamarcelavaronramirez.2016.pdf>
- Velasco, J. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. https://www.researchgate.net/publication/315114517_Importancia_de_la_materia_organica_en_el_suelo
- Velásquez, F. (2013). Inventario y uso sostenible de pastizales en la zona colindante a los depósitos de Relavera de Ocroyoc - Comunidad San Antonio de Rancas - Pasco. Perú: Universidad Católica del Perú. http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5191/ALEGRIA_VELASQUEZ_FIORELLA_INVENTARIO_PASCO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Verstraeten, W., Veroustraete, E., y Feyen, F. (2008). Assessment of Evapotranspiration and Soil Moisture Content Across Different Scales of Observation. www.researchgate.net/publication/26547505_Assessment_of_Evapotranspiration_and_Soil_Moisture_Content_Across_Different_Scales_of_Observation
- Villarroya, F. (2006). Apuntes de Hidrogeología. Tema 2. <https://docplayer.es/7827733-Apuntes-de-hidrogeologia-tema-2.html>
- Whalley, W., Ober, E., y Jenkins, M. (2013). Measurement of the matric potential of soil water in the rhizosphere. <https://academic.oup.com/jxb/article/64/13/3951/436040>
- White, R. (2006). Principles and Practice of Soil Science. *The Soil as a Natural Resource*. Cuarta Edición. <https://www.pdfdrive.com/principles-and-practice-of-soil-science-the-soil-as-a-natural-resource-d34478756.html>
- Warren, S., Nevill, M., Blackburn, W., y Garza, N. (1986). Soil response to trampling under intensive rotation grazing. *Soil Science Society of America Journal*, 53.
- Warren, J., y Taylor, R. (2010). Managing Soil Compaction. <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-2638/PSS-2244web2014.pdf>
- Weynants, M., Vereecken, H., y Javaux, M. (2009). Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions: Introducing a Closed-Form Hydraulic Model. https://www.researchgate.net/publication/225007975_Revisiting_Vereecken_Pedotransfer_Functions_Introducing_a_Closed-Form_Hydraulic_Model
- Welke, S., y Fyles, J. (2005). When Texture Matters: *Compaction in Boreal Forest Soils*. <https://www.for.gov.bc.ca/hfd/library/documents/bib97011-note11.pdf>
- Wolkowski, R., y Lowery, B. (2008). Soil compaction: Causes, concerns, and cures. <http://www.soils.wisc.edu/extension/pubs/A3367.pdf>

- Wraith, J., y Or, D. (1999). Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/1998WR900006>
- Zazueta, O., y Xin, J. (1994). Soil Moisture Sensors. <https://p2infohouse.org/ref/08/07697.pdf>
- Zerpa, G., Sosa, O., Berardi, J., Bolatti, J., Galindo, A., y Maldonado, J. (2013). La resistencia mecánica a la penetración en pasturas. <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/35/12AM35>
- Zuluaga, A., Giraldo, C., y Chará, J. (2011). Servicios ambientales que proveen los Sistemas Silvopastorales y los beneficios para la biodiversidad. <http://www.cipav.org.co/pdf/4.Servicios.Ambientales.pdf>

6. Anexos

Anexo 1

Ficha de Descripción de los Perfiles de Suelos del Área de Salapa en los Sitios Seleccionados en Función del Uso del Suelo y la Pendiente del Terreno

Código: P1Z. Fecha: 02/05/2014. Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua y Luís Valarezo.

Altitud: 2 145 m s.n.m. Coordenadas: Latitud Sur:03° 14' 9" ; Longitud Oeste: 79° 23' 11"

Pendiente: 28%.

Paisaje: colina. Tipo de relieve: vertiente. Forma del Terreno: ladera.

Uso Actual o cobertura vegetal: Pasto.

Condiciones de Humedad: húmedo. Pedregosidad superficial: 0 %. Tamaño: cm

Afloramientos rocosos: No. Tipo:_No. Material parental: metamórfico con cuarzo

Profundidad de la capa freática: No. Presencia de Sales o Alcalis: libre. Drenaje: algo pobre

Descripción individual de los horizontes o capas P1Z:

- Ap 00 - 15 cm Pardo amarillento oscuro (10YR 3/6) en húmedo; arcillo limoso al tacto; bloques subangulares finos y medios, moderadamente desarrollados; adherente, plástico y firme en húmedo, muy duro en seco; cutanes zonales delgados; poros muchos y finos; raíces muy finas y abundantes; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.
- AE 15 - 35 cm Pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo, con 30% de manchas rojo oscuro (2.5YR 4/8); franco arcillo limoso al tacto; bloques subangulares, medios, fuertemente desarrollados; adherente, plástico y firme en húmedo, muy duro en seco; cutanes continuos y moderadamente espesos; poros pocos muy finos; raíces finas y muy pocas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.
- Bth 35 - 55cm Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, con 30% de manchas pardo amarillento (10YR 5/6), grandes, destacadas de límite brusco; arcilloso al tacto; bloques angulares, gruesos, desarrollados; muy adherente, muy plástico, muy firme en húmedo, muy duro en seco; cutanes zonales y delgados; poros muy pocos y muy finos; pocas raíces finas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.
- CB 55 - 70 cm Pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo; arcilloso al tacto; bloques angulares y subangulares, medios y gruesos, moderadamente desarrollados; muy adherente, plástico, muy firme en húmedo y muy duro en seco; poros muy pocos y muy finos; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.
- C 70 - 120 cm Pardo amarillento (10YR 5/8) en húmedo; con 10% de manchas pardas (10YR 5/4); franco arcillo limoso al tacto; bloques angulares, moderadamente desarrollado; adherente, ligeramente plástico, firme en húmedo y duro en seco; sin reacción al HCl diluido.

Código: P2Z. Fecha: 02/05/2014. Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua y Luís Valarezo.

Altitud: 2 139 m s.n.m. Coordenadas: Latitud Sur: 03° 55' 35" ; Longitud Oeste: 79° 14' 12"

Pendiente: 20%.

Paisaje: colina; Tipo de relieve: vertiente. Forma del Terreno: ladera.

Uso Actual o cobertura vegetal: Rastrojo de hortalizas: col, lechuga, brócoli.

Condiciones de Humedad: húmedo. Pedregosidad superficial: 0 %. Tamaño: cm

Afloramientos rocosos: No. Tipo: No. Material parental: filitas y cuarcitas

Profundidad de la capa freática: No. Presencia de Sales o Alcalis: libre. Drenaje: algo pobre

Descripción individual de los horizontes o capas P2Z:

Ap 00 - 05 cm Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; arcillo limoso al tacto; bloques subangulares medios, moderadamente desarrollados; adherente, plástico, firme; cutanes zonales delgados; poros muchos y finos; raíces abundantes, finas y muy finas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

Bth 05 - 30 cm Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, con 10% de manchas pardo amarillento (10YR 5/6), medianas, definidas de límite brusco; arcilloso al tacto; bloques angulares, medios fuertemente desarrollados; muy adherente, muy plástico y firme en húmedo, muy duro en seco; cutanes continuos y delgados; poros pocos y muy finos; raíces muy finas y muy pocas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

- BCh 30 - 65cm Pardo amarillento (10YR 5/8) en húmedo, con 10% de manchas pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2), grandes, definidas de límite brusco; arcillo limoso al tacto; bloques angulares, gruesos, fuertemente desarrollados; adherente, plástico y friable en húmedo, muy duro en seco; cutanes continuos y delgados; sin raíces; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.
- C 65 - 120+ cm Pardo amarillento (10YR 5/6) en húmedo; con 10% de manchas amarillo parduzco (10YR 6/6), grandes; franco limoso al tacto; masivo; adherente, plástico y friable en húmedo, muy duro en seco; sin raíces; sin reacción al HCl diluido.

Código: P3Z. Fecha: 03/05/2014. Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua y Luís Valarezo.

Altitud: 2 215 m s.n.m. Coordenadas: Latitud Sur: 03° 55' 12,5" ; Longitud Oeste: 79° 13' 55,6"

Pendiente: 12%

Paisaje: montaña. Tipo de relieve: loma. Forma del Terreno: ondulado.

Uso Actual o cobertura vegetal: cultivo de hortalizas: col, lechuga, brócoli.

Condiciones de Humedad: húmedo. Pedregosidad superficial: 0 %. Tamaño: cm

Afloramientos rocosos: No. Tipo: _No. Material parental: filitas

Profundidad de la capa freática: No. Presencia de Sales o Alcalis: libre. Drenaje: moderado

Descripción individual de los horizontes o capas P3Z:

Ap 00 - 06 cm Pardo amarillento oscuro (10YR 3/6) en húmedo; franco arcillo limoso al tacto; gránulos medios y bloques subangulares medios, moderadamente desarrollados; adherente, plástico y firme en húmedo; poros muchos y finos; raíces finas y abundantes; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

Bt 06 - 16 cm Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo, con 20% de manchas amarillo parduzco (10YR 6/6), medianas y grandes, definidas, de límite brusco; arcilloso limoso al tacto; bloques subangulares, medios y grandes, fuertemente desarrollados; adherente, plástico y firme en húmedo, muy duro en seco; cutanes delgados y zonales, poros pocos y muy finos; raíces muy finas y comunes; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

C 16 - 120+ cm Pardo amarillento (10YR 5/6) en húmedo; con 5% de manchas gris claro (10YR 7/1) grandes, definidas y de límite difuso y 5% de manchas amarillo rojizo (7.5YR 6/8), grandes, definidas y de límite neto; franco limoso al tacto; masivo; ligeramente adherente, ligeramente plástico y friable en húmedo; sin raíces; sin reacción al HCl diluido.

Código: P4Z. Fecha: 03/05/2014 Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua y Luís Valarezo

Altitud: 2 220 m s.n.m. Coordenadas: Latitud Sur: 03°55' 11,5" ; Longitud Oeste: 79°13' 54,3"

Pendiente: 14%

Paisaje: montaña; Tipo de relieve: loma. Forma del Terreno: pendiente media

Uso Actual o cobertura vegetal: pastos

Condiciones de Humedad: húmedo. Pedregosidad superficial: 0 %; Tamaño: cm

Afloramientos rocosos: No. Tipo: _No. Material parental: filitas y cuarzo

Profundidad de la capa freática: No. Presencia de Sales o Alcalis: libre. Drenaje: moderado

Descripción individual de los horizontes o capas P4Z:

Ap 00 - 06 cm Pardo (10YR 4/3) en húmedo; franco limoso al tacto; gránulos medios fuertemente desarrollados; adherente, plástico, friable; poros muchos y finos; raíces abundantes, finas y muy finas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

AB 06 - 22 cm Pardo (10YR 4/3) en húmedo; franco arcillo limoso al tacto; bloques subangulares, medios fuertemente desarrollados; adherente, plástico y firme en húmedo; raíces muy finas y muy pocas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

BC 22 - 40cm Pardo (10YR 4/3) y amarillo parduzco (10YR 6/8); arcillo limoso al tacto; bloques angulares, gruesos, fuertemente desarrollados; adherente, plástico y firme en húmedo; raíces finas y pocas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

C 40 - 120+ cm Amarillo parduzco (10YR 6/8) en húmedo; con 10% de manchas rojo oscuro (2.5YR 4/8), grandes, destacadas de límite brusco; franco limoso al tacto; masivo; ligeramente adherente, ligeramente plástico y friable en húmedo; sin raíces; sin reacción al HCl diluido.

Código: P5Z. Fecha: 26/06/2014 Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua y Luís Valarezo

Altitud: 2 328 m s.n.m. Coordenadas: Latitud Sur: 03°54'46,6" ; Longitud Oeste: 79°14' 40,5"

Pendiente: 3%

Paisaje: montaña. Tipo de relieve: terraza. Forma del Terreno: rellano

Uso Actual o cobertura vegetal: pastos. Condiciones de Humedad: húmedo.

Pedregosidad superficial: 0 %. Tamaño: cm. Material parental: filitas

Profundidad de la capa freática: No; Presencia de Sales o Alcalis: libre. Drenaje: algo pobre

Descripción individual de los horizontes o capas P5Z:

Ap 00 - 08 cm Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; arcillo limoso al tacto; gránulos finos y medios, moderadamente desarrollados; ligeramente adherente, muy plástico y friable en húmedo; poros muchos y finos; raíces finas y abundantes; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

AB 08 - 15 cm Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, con 40% de manchas rojo oscuro (2.5YR 4/6), pequeñas, medianas y definidas de límite neto; arcilloso al tacto; bloques subangulares, finos y medios, moderadamente desarrollados; adherente, plástico y friable en húmedo; cutanes zonales y delgados; raíces finas y abundantes; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

Bt15 - 30cm Pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo, con 10% de manchas pardo fuerte (7.5YR 5/8), medianas, definidas, de límite neto; arcilloso al tacto; bloques subangulares, finos y medios moderadamente desarrollados; muy adherente, ligeramente plástico y friable en húmedo; cutanes zonales y delgados; muy pocas raíces finas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

- BC1 30 - 53 cm Pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) y amarillo parduzco (10YR 6/8); franco arcillo arenoso al tacto; bloques subangulares, finos y medios moderadamente desarrollados; muy adherente, ligeramente plástico y friable en húmedo; cutanes zonales y delgados; poros muy pocos y muy finos; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.
- BC2 53 - 70 cm Pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; con 20% de manchas rojo pálido (2.5YR 7/2) grandes, definidas y de límite neto; arcillo limoso al tacto; bloques subangulares, finos y medios moderadamente desarrollados; muy adherente, plástico y friable en húmedo; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.
- C 70 - 120+ cm Blanco rosado (7.5YR 8/1) (50%), pardo fuerte (7.5YR 5/8) (30%) y rojo amarillento (5YR 5/8) (20%) en húmedo; franco arcillo arenoso al tacto; masivo; ligeramente adherente, ligeramente plástico y muy friable en húmedo y duro en seco; sin reacción al HCl diluido.

Código: P6Z. Fecha: 03/05/2014. Autores: Carlos Valarezo, Miguel Villamagua y Luís Valarezo

Altitud: 2 349 m s.n.m. Coordenadas: Latitud Sur: 03°54'33,64"; Longitud Oeste: 79°14' 47,4"

Pendiente: 28%

Paisaje: montaña. Tipo de relieve: loma. Forma del Terreno: pie de pendiente.

Uso Actual o cobertura vegetal: Cultivo de brócoli y lechuga.

Condiciones de Humedad: húmedo. Pedregosidad superficial: 0 %; Tamaño: cm

Afloramientos rocosos: No. Tipo: _No. Material parental: coluvial metamórfico

Profundidad de la capa freática: No. Presencia de Sales o Alcalis: libre. Drenaje: moderado

Descripción individual de los horizontes o capas P6Z:

Ap00 - 18 cm Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; arcillo limoso al tacto; bloques subangulares medios, moderadamente desarrollados; adherente, muy plástico y friable; poros muchos y finos; raíces finas y abundantes; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

Bt1 18 - 31 cm Pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo, con 40% de manchas rojas (2.5YR 3/8), medianas, destacadas y de límite brusco; arcilloso al tacto; bloques angulares, gruesos, fuertemente desarrollados; muy adherente, muy plástico y firme en húmedo; cutanes continuos y moderadamente espesos; poros pocos y finos; raíces finas y muy pocas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

Bt2 31 - 55cm Pardo (7.5YR 4/2) en húmedo; arcilloso al tacto; bloques angulares, medios, fuertemente desarrollados; muy adherente, muy plástico y firme en húmedo; cutanes zonales y delgados;

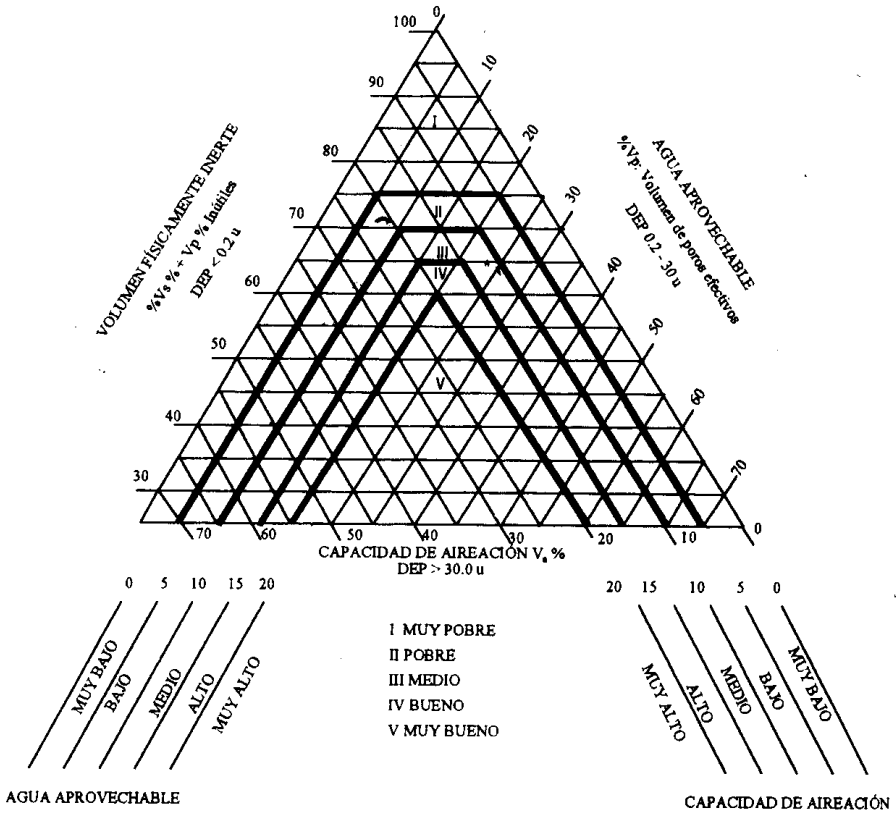
poros muy pocos y muy finos; pocas raíces finas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

BC 55 - 80 cm Pardo (7.5YR 4/2) en húmedo; arcillo limoso al tacto; bloques subangulares, medios, moderadamente desarrollados; adherente, plástico y friable en húmedo; poros muy pocos y muy finos; raíces finas y muy pocas; sin reacción al HCl diluido; límite brusco y plano.

C 80 - 120+ cm Pardo (7.5YR 4/2) en húmedo; franco limoso al tacto; masivo; adherente, ligeramente plástico y muy friable en húmedo; sin raíces; sin reacción al HCl diluido.

Anexo 2

Diagrama Triangular para Evaluar la Condición Física de los Suelos para el Crecimiento de las Plantas





unl

Universidad
Nacional
de Loja



Luis Valarezo Manosalvas

Se graduó de ingeniero agrícola en 1982 en la Universidad Nacional de Loja-Ecuador. En 1996 obtuvo el título Especialidad en Riego Comunitario Andino y en el 2005 el título de Magister en Riego en la misma universidad. Durante cuatro años realizó pruebas hidro-pedológicas e investigaciones sobre la relación suelo-agua-planta en varios cultivos, en el área ecuatoriana del Proyecto Binacional Puyango -Tumbes. Ha participado en varios estudios de consultoría en el ámbito de suelos y aguas. Durante 30 años se desempeñó como docente - investigador de la Universidad Nacional de Loja en las asignaturas de física de suelos y riego. Publicaciones: libros 3, artículos científicos 6.



Carlos Valarezo Manosalvas

Se graduó de ingeniero agrónomo en 1974 en la Universidad Nacional de Loja (UNL). Máster en Física y Química de Suelos, Universidad Estatal de Gante, Bélgica, 1978. Estudios en Drenaje de Tierras, Universidad Agraria de Wageningen, Holanda 1983. Estudios de Física de Suelos, Trieste, Italia, 1985. Estudios de Riego y Drenaje, Universidad de Guayaquil, 1988. Estudios de Gestión Ambiental, UAMM, México, 1992. Asesor de Suelos de PREDESUR, 1980-1986. Jefe del Departamento de Riego de PREDESUR, 1986-1988. Director del Programa de Maestría en Desarrollo Rural, UNL, 1991 - 1994. Director del Postgrado en Riego Comunitario Andino, UNL 1995-1996.

Director General del Centro de Estudios de Postgrado UNL, 1999-2002. Docente - Investigador de la Universidad Nacional de Loja durante 35 años, asignaturas: química agrícola, física de suelos, manejo y conservación de suelos. Publicaciones: libros 4; apartados de libros 5, artículos científicos 46.



Mario Mancino Valdivieso

Se graduó de Técnico en Nivel Superior en Administración Agrícola en 1996, en el Centro de Formación Técnica Agrícola, Sociedad Nacional de Agricultura, Paine, Chile. Diplomado en Perfeccionamiento Administración de Empresas, Universidad Adolfo Ibáñez, Valparaíso, Chile, 1996. Ingeniero en Administración de Empresas Universidad Técnica Particular de Loja, 2009. Presidente Ejecutivo del Criadero Santa Rosa de 2003 a 2005. Gerente General de Valdivieso-Burneo Sociedad Agrícola, 2005 - 2010. Gerente Administrativo de las Haciendas Agropecuarias: Obra Pía, Salapa Bajo y Guindo, provincia de Loja, 1997 - 2018. Vocal principal del Directorio de la Asociación Holstein friesian del

Ecuador, 2014-2016. Asesor Técnico Pecuario de la Prefectura de Loja, 2014-2018. Profesor titular de la cátedra de Administración Agropecuaria en la Universidad Técnica Particular de Loja, 2012. Premio al Mejor Criador de Ganado en la Feria Agropecuaria de Loja, 2002, 2003, 2004, 2006, 2007, 2008 y 2013.

