

LIMITANTES Y MANEJO DE LOS SUELOS SALINOS Y/O SODICOS EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO

Editores Científicos:

Hervé D., Ledezma R., Orsag V.



La Paz, Junio 2002

**Esta síntesis ha sido posible gracias al apoyo financiero del Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (Condesan) y su edición está a cargo del IRD:
IRD - Institut de recherche pour le développement
Av. Hernando Siles N° 5290 Esq. Calle 7 - Obrajes - Casilla Postal 9214,
La Paz- Bolivia**

2002

Edición de 140 ejemplares

Foto 1: "Río Desaguadero"

Foto 2: "Siembra de quinua en zanja"

Fotos : Dominique HERVE

LIMITANTES Y MANEJO DE LOS SUELOS SALINOS Y/O SODICOS EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO

Editores Científicos:

Hervé D., Ledezma R., Orsag V.



068
EROSOL
HER

La Paz, Junio 2002

6 MAI 2003



PRESENTACION

El Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) (ex-ORSTOM) ha adquirido en las dos décadas pasadas una competencia reconocida sobre la cuenca del lago Titicaca y su única salida, el río Desaguadero. Varios hidrólogos, hidroquímicos e hidrobiólogos han analizado, junto con colegas bolivianos de la UMSA, el origen de la salinidad del lago Titicaca y de las aguas y suelos del altiplano boliviano.

El CONDESAN, Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecoregión Andina, con sede en el Centro Internacional de la Papa (Lima, Perú), busca desarrollar sinergia entre proyectos y actores de la región. Las experiencias nacionales raras veces trascienden las fronteras y los resultados de investigación frecuentemente no son conocidos por los agentes del desarrollo ni por los políticos. Un objetivo del Condesan es hacer que los resultados de investigación sean utilizables para el desarrollo a nivel regional.

Así, cuando el IRD respondió en 1995-1996, junto con el Instituto Boliviano de Tecnología agropecuaria (IBTA) y una ONG, Yunta, a un concurso con propuestas de investigación financiado por los Países Bajos y manejado por Condesan, la meta se limitaba a la rehabilitación de suelos salinos mediante el uso de subsolado. Pero la preocupación de varios edafólogos y agrónomos, en particular dentro de la Sociedad Boliviana de Ciencia del Suelo, por el impacto que tendrá la represa construida en la desembocadura del lago Titicaca sobre la salinidad de las aguas y suelos del altiplano, resultó en una propuesta más ambiciosa de elaborar un libro de síntesis sobre el manejo de suelos salinos en la cuenca del Desaguadero. Condesan financió la preparación del libro y el IRD su edición en Bolivia.

Regar suelos salinos con agua salada es complejo si se quiere preservar el recurso suelo de una salinización irreversible. En este libro se demuestra, en el caso bastante documentado del altiplano central boliviano, que es posible, a condición de comprender el funcionamiento del sistema agua-suelo-planta, establecer los pasos para definir reglas sobre el uso del suelo y monitorear el estado de los recursos suelo y agua. Por ello, se aborda aspectos delicados como la clasificación de los suelos salinos y los métodos de evaluación de la salinidad. Se identifica a la vez conocimientos que son necesarios para actuar así como preguntas que quedan pendientes para la investigación. Los autores han reunido y discutido varios tipos de conocimiento: modelos, resultados experimentales, experiencias concretas de desarrollo, procedimientos de laboratorio, que deben ser combinados al momento de tomar decisiones sobre el manejo de los recursos.

Este tema ha sido estudiado en los medios subdesérticos del sur de la ecorregión andina (Sur peruano, Bolivia, el norte de Chile y Argentina) pero también ha sido estudiado en otras partes del mundo, lo que justificaría estudios comparativos. Finalmente, la viabilidad de una "agricultura salada" concierne en primer lugar a los actores de la vida civil, agricultores, ganaderos y pobladores quienes deben ganarse escenarios de concertación y de negociación con las empresas (constructoras, mineras) y los representantes del estado. Esta síntesis, contextualizada, de conocimientos sobre suelos salinos es una base sólida para que los pobladores piensen en su futuro.



Jean-Pierre Carmouze
(IRD)



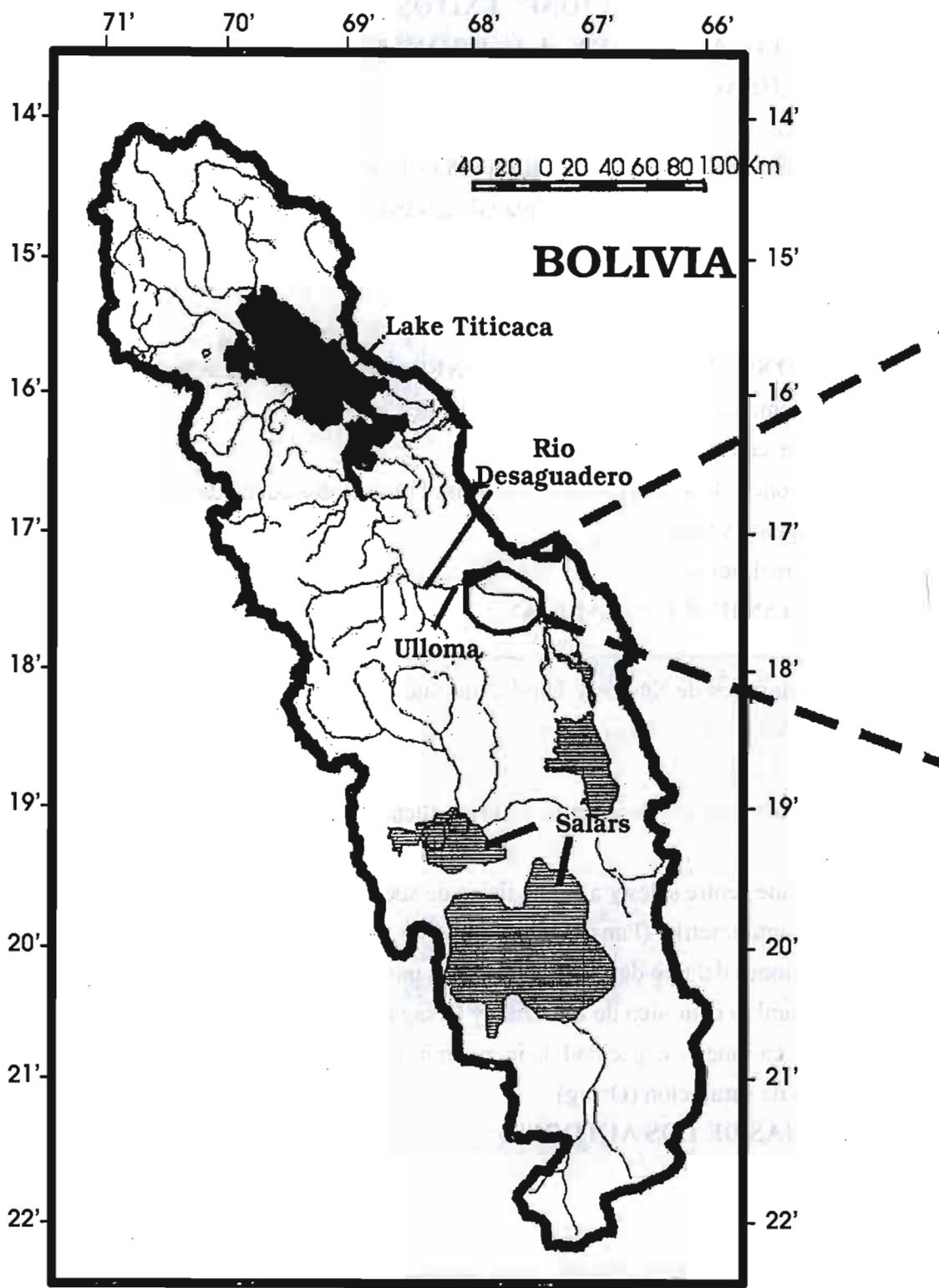
Hector Cisneros
(CONDESAN)

INDICE

	Pag.
1. INTRODUCCION (Hervé, Ledezma, Orsag)	1
2. PROBLEMATICA DEL ALTIPLANO CENTRAL BOLIVIANO	
(Ledezma & Flores)	6
2.1. Ubicación	
2.2. Clima	
2.3. Geología y geomorfología de suelos	
2.4. Vegetación	
2.5. Actividades productivas	
3. ANALISIS HIDROLOGICO DE LA SALINIDAD	15
3.1. Recursos hídricos superficiales (Ledezma & Hervé)	
3.1.1. Rio Desaguadero	
3.1.2. Regulación del sistema TDPS	
3.2. Recursos hídricos subterráneos y salinidad	
3.2.1. Cambios climáticos y reciclaje durante varios miliares de años cloruro entre lagos y agua subterránea, ejemplo del Altiplano boliviano (Coudrain, Talbi, Ledoux, Ribstein, de Marsily)	
3.2.2. Localización, caracterización y extracción de los acuíferos en Villarroel (Coudrain & Ledezma)	
3.2.3. Relación entre hidrogeología y salinidad de los suelos en la provincia Aroma (Flores, Hervé, Mita)	
3.2.4. Aguas superficiales y subterráneas en San José de Llanga (Peña & Coudrain)	
3.3. Calidad del agua (Orsag)	
3.3.1. Contenido en sales	
3.3.2. Concentración en metales pesados	
3.3.3. Calidad de agua con fines de riego	
4. SUELOS SALINOS Y/O SODICOS	59
4.1. Principios del origen, formación y clasificación de los suelos salinos y/o sódicos (Orsag & Flores)	
4.2. Los suelos salinos y/o sódicos en la llanura fluvio lacustre	
4.2.1. Origen de la salinidad en la llanura fluvio lacustre	
4.2.2. Llanura de inundación Sur, provincia G. Villarroel (Jacobsen & Bosque)	
4.2.3. Llanura no inundable, provincia Aroma (Hervé)	

- 4.3. Problemática del análisis químico de suelos salinos y/o sódicos (Chungara)
 - 4.3.1. Variables y métodos de análisis
 - 4.3.2. Claves de verificación de los resultados del análisis químico
 - 4.3.3. Recomendaciones
- 4.4. Efecto de sales, sodio y boro sobre las propiedades del suelo (Orsag)
 - 4.4.1. Características generales de los sales presentes en suelos salinos
 - 4.4.2. Caso del Boro
- 4.5. Efectos osmóticos de sales sobre la disponibilidad de agua para las plantas (Jacobsen, Bosque, Orsag)
- 5. MANEJO DE SUELOS SALINOS..... 106**
- 5.1. Problemática del manejo de los suelos salinos en G. Villarroel (Hervé & Ledezma)
- 5.2. Efectos del subsolado sobre suelos salinos y cultivos de la sucesión (Hervé, Ramos, Mita)
 - 5.2.1. Objetivos
 - 5.2.2. Campaña 1994-95
 - 5.2.3. Campaña 1995-96
 - 5.2.4. Conclusiones sobre el trabajo del suelo
- 5.3. Siembra de especies tolerantes
 - 5.3.1. Potencial de producción de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en G. Villarroel (Jacobsen & Bosque)
 - 5.3.2. Siembra de kauchi (*Suaeda foliosa*) en áreas salinas consideradas marginales para la agricultura (Ledezma)
 - 5.3.3. Sucesiones de cultivos adaptados a la salinidad (Hervé)
- 5.4. Manejo del agua de riego
 - 5.4.1. Fuentes de agua y técnicas de riego (Ledezma)
 - 5.4.1.1. Fuentes de agua
 - 5.4.1.2. Técnicas de riego a la parcela
 - 5.4.2. Impactos del riego
 - 5.4.2.1. Consecuencias pedoquímicas de la irrigación en Chokonimaya, provincia Aroma (Flores)
 - 5.4.2.2. Impactos del riego sobre suelos y vegetación en Choro y Chilahuala, provincia G. Villarroel (Orsag & Miranda)
 - 5.4.2.3. Efectos del riego sobre los procesos de salinización y sodificación, en suelos de la provincia G. Villarroel (Ledezma)

6. QUINCE AÑOS DE RELACIONES EXITOSAS ENTRE DESARROLLO E INVESTIGACION EN LA PROVINCIA G. VILLAROEL (Ledezma & Hervé)	198
6.1. Introducción	
6.2. Asistencialismo y primeros estudios (1983 - 1990)	
6.3. De proyectos puntuales hacia un plan de desarrollo basado en investigaciones científicas (1991 -1995)	
6.4. Desarrollo municipal y producción ganadera (1996-1999)	
6.5. Conclusión	
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES (Hervé, Orsag, Ledezma)	210
7.1. Replanteamiento de las afirmaciones iniciales	
7.2. Qué no se sabe?	
7.3. Propositiones de investigación orientadas al manejo sostenible de los recursos suelo, agua y vegetación	
7.4. Manejo institucional	
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	225
9. ANEXOS	252
9.1. Grupos Mayores de Suelos y Unidad de Suelo, relacionados con los suelos salinos/alcalinos o yesosos, en la clasificación de suelos FAO-UNESCO (Orsag & Flores)	
9.2. Guía para diferenciar sub-unidades en la clasificación de suelos FAO-UNESCO (Flores)	
9.3. Interacciones entre sales y análisis físico de suelo (Pansu & Gautheyrou)	
9.3.1. Granulometría (Pansu)	
9.4. Implicaciones del tipo de arcilla sobre sales intercambiables y de la capacidad de intercambio catiónico de Ledezma y Orsag (Gautheyrou)	
9.5. Suma de cationes y capacidad de intercambio catiónico (Hervé & Pansu)	
9.6. Extracto de saturación (Orsag)	
10. REFERENCIAS DE LOS AUTORES.	266



Localización de la llanura fluvio-lacustre

LIMITANTES Y MANEJO DE LOS SUELOS SALINOS Y/O SODICOS EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO

Hervé D., Ledezma R., Orsag V.

(Editores científicos)

1. INTRODUCCIÓN (D. Hervé, R. Ledezma, V. Orsag)

La problemática de los suelos salinos en Bolivia abarca no solamente la cuenca del río Desaguadero en el altiplano boliviano, sino también el valle alto y central de Cochabamba (Torrez et al., 1996), los valles de Santa Cruz, el Chaco y las llanuras de depresión en el Beni. El futuro de estas áreas extensas es motivo de preocupación para una población agrícola importante.

Los problemas de salinidad son más extensos en los climas semiáridos a áridos, donde la evapotranspiración supera a la precipitación. En el territorio boliviano, marginalizan grandes extensiones de las actividades agropecuarias. Falta cuantificar los recursos afectados e implementar acciones de recuperación de suelos prácticas y económicas, al alcance de los pobladores, comunidades, municipios y provincias.

Siendo las posibilidades del aprovechamiento de los recursos hídricos limitadas en el altiplano, se deben analizar cuidadosamente todas las posibilidades. Una de estas posibilidades es el aprovechamiento de las aguas del río Desaguadero, que se origina en el Lago Titicaca y constituye por ello una alternativa importante (Figura 1.1). La construcción de una represa en el río Desaguadero, por la Autoridad del Lago Titicaca (ALT, entidad binacional Perú-Bolivia), a la desembocadura del lago Titicaca, despierta varias preguntas, entre las cuales, el futuro lecho y caudal del Desaguadero y la aptitud de esta agua para riego en el altiplano central boliviano. Los principales objetivos de esta represa son la regulación del caudal del río Desaguadero para evitar inundaciones y el aumento de este caudal en la época de estiaje.

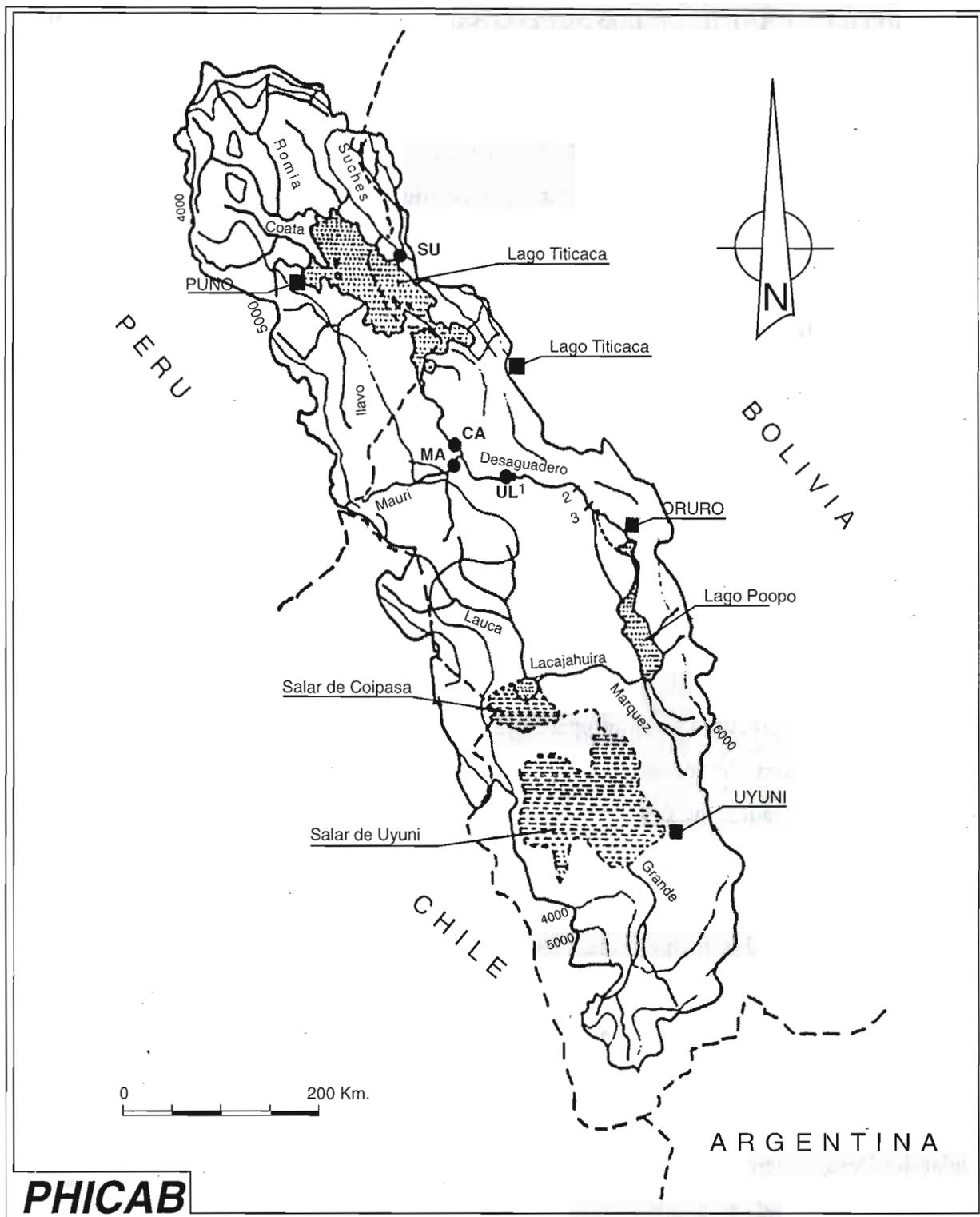


Figura 1.1 La cuenca del río Desaguadero en el altiplano boliviano

Estaciones de medida: SU Suchez, MA Mauri, CA Calacoto Desaguadero, UL Ulloma Desaguadero, 1) Puerto Japones, 2) Puente Soledad, 3) Puente Carasilla

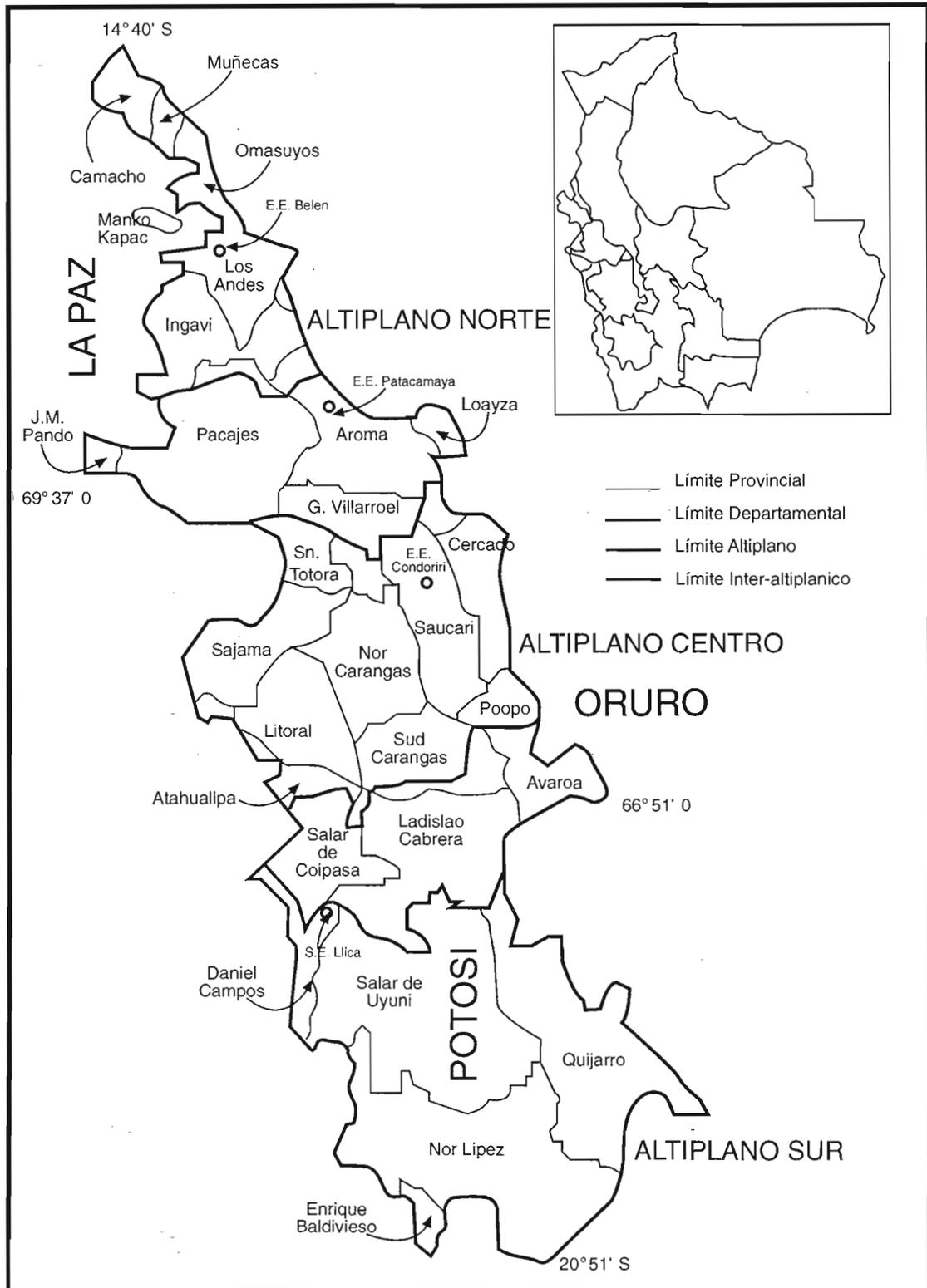


Figura 1.2. Delimitación administrativa de los Altiplanos Norte, Centro y Sur (Paz, 2002)

Hasta el momento, se ha cuestionado bastante el aprovechamiento de aguas saladas para regar suelos salinos, sin tomar en cuenta las experiencias desarrolladas por los propios habitantes del lugar, quienes viven de la ganadería y riegan especies forrajeras desde hace muchos años.

El ALT estimó en 9000 km² el área con riesgos de salinidad en la cuenca del Desaguadero. La cuestión básica es entonces saber ¿cómo se puede regar suelos salinos con agua salada? La respuesta no es tan sencilla como se podría creer. No es suficiente repetir ideas falsas o demasiado generales sobre el potencial o, al contrario, los riesgos de tal riego. Es tiempo más bien de realizar un diagnóstico serio de lo que se sabe y de lo que todavía no se sabe en cuanto a suelos, cultivos, balance hidrológico y de salinidad, que incorpore tanto aguas superficiales como subterráneas, para usos domésticos, riego o usos industriales (minas).

Tomaremos como punto de partida algunas afirmaciones que se escuchan frecuentemente:

- (1) Si llueve menos de 400 mm por año, sólo con riego se puede producir.
- (2) Las aguas del Desaguadero son demasiado salinas para poder usarlas para riego.
- (3) Se puede duplicar el área bajo riego con el uso de aguas subterráneas.
- (4) El campesino no tiene experiencia de riego en la zona, o es demasiado reciente.
- (5) Las prácticas de riego inadecuadas son factores que coadyuvan a la salinización.
- (6) El riego con aguas del Desaguadero contamina los acuíferos dulces.
- (7) El agua del Desaguadero está contaminada con metales pesados, su uso es peligroso para el consumo humano.

Se cuestiona entonces el uso de aguas salinas para el riego de suelos salinos, señalando problemas de contaminación, de inapropiada aplicación de riego por parte de los usuarios y la falta de cultivos alternativos que justifiquen una inversión económica. Se señala a la vez la escasez del recurso agua en la zona y el problema crucial de su calidad. Los limitantes de los suelos salinos y/o sódicos deben ser analizados en un contexto más amplio. Estas preguntas tocan varios aspectos: suelos, cantidad y calidad de las aguas superficiales y subterráneas, factibilidad del riego, usos múltiples (consumo humano, riego, minas). Claro está que no se podrían dar respuestas parciales o completas a estas preguntas sin una amplia colaboración entre disciplinas complementarias, hidrología, geología, edafología y agronomía. Estas respuestas no son

esperadas solamente por los científicos sino también por los especialistas del desarrollo, de las ONGs principalmente, que pueden documentar experiencias exitosas de rehabilitación llevadas a cabo en el altiplano. Algunas preguntas encontrarán respuesta; se mejorará la formulación de otras. Se quiere también dejar claras las que siguen pendientes, con la finalidad de orientar futuras investigaciones y prioridades de desarrollo. Una siguiente etapa sería lógicamente buscar fuera de Bolivia, en otros países tropicales donde se presentan los mismos problemas, algunas respuestas a estas preguntas.

El reto de este libro de síntesis consiste entonces en recolectar los conocimientos locales, a menudo muy dispersos, en verificar su solidez científica y en confrontarlos entre las disciplinas involucradas. Se cuenta también con varias experiencias acumuladas por ONGs desde sus primeras intervenciones en la zona a raíz del Niño de 1983, una grave sequía seguida de inundaciones catastróficas. 15 años de experiencias exitosas de rehabilitación de suelos salinos y/o sódicos, en contacto con equipos de investigación, demuestran que existen estrategias comprobadas de recuperación de suelos. Esta realidad parece ser en parte desconocida por el Estado que siempre ha desatendido a estas provincias del altiplano.

Limitamos el ámbito de validación de estas respuestas a la cuenca del río Desaguadero, en las provincias de Villarroel y Aroma del (departamento de La Paz), pudiendo extrapolarse hasta el lago Poopó en las provincias Tomás Barrón, Cercado y Saucarí del departamento de Oruro (Figura 1.2). Es en esta zona que encontramos la mayor concentración de estudios y acciones de rehabilitación de suelos salinos. Es también en la provincia de G. Villarroel que el IBTA desarrolló un proyecto de investigación sobre labranza en suelos salinos (1995-1997), luego de ganar fondos a concurso provenientes de los Países Bajos y manejados por Condesan. El Consorcio para el desarrollo sostenible de la ecoregión andina apoyó con estos fondos la elaboración de este libro de síntesis que, conforme a los supuestos de Condesan, busca un encuentro entre resultados de investigación y propuestas de desarrollo.

Después de recordar conocimientos necesarios sobre el altiplano central boliviano en suelo, agua y vegetación, revisamos el estado de los recursos agua (superficial y subterránea) y suelo en las provincias Villarroel y Aroma, y los métodos de determinación de la salinidad. Se presenta luego

tres estrategias de rehabilitación de los suelos salinos y/o sódicos: manejo de suelos, introducción de especies tolerantes y manejo del agua para riego. Se finaliza con una reflexión sobre las relaciones entre proyectos de investigación y acciones de desarrollo en la provincia G. Villarroel, para comprobar la sostenibilidad de las propuestas ya implementadas.

2. PROBLEMÁTICA DEL ALTIPLANO CENTRAL BOLIVIANO (R. Ledezma, M. Flores)

2.1. Ubicación

El altiplano boliviano, situado a una altitud promedio de 3800 msnm., tiene una superficie aproximada de 20 000 km². El altiplano central se extiende entre los 16°50' a 19° 00' de latitud Sur y de 67° 30' a 69° 40' de Longitud Oeste, en el Sur del departamento de La Paz y el departamento de Oruro (Fig. 1.2). Abarca colinas, serranías y altas planicies de sedimentos fluviales y lacustres, cuyos suelos son constituidos de sedimentos fluviolacustres, eólicos de origen sedimentario y volcánico. Parte del río Desaguadero inunda periódicamente las zonas más bajas en los meses de verano. En este ámbito semiárido a árido, predominan los arbustos dentro de comunidades vegetales donde las más productivas para el ganado son los bofedales, pajonales, tholares y gramadales (Alzérreca, 1987).

En el departamento de La Paz, las provincias Gualberto Villarroel y Aroma reciben los aportes del Desaguadero en ambas riveras del río, por sus afluyentes o mediante canales de riego (Figura 2.1). Entre los paralelos 17° y 18° de latitud Sur y 67° 30' y 68° 30' de longitud Oeste, la provincia Gualberto Villarroel limita al Oeste y Norte con la provincia Pacajes, al Sur con las provincias San Pedro de Totora y Tomas Barrón de Oruro. En la otra ribera, en la provincia Aroma y con acceso al río Kheto, un punto de referencia bastante estudiado por el Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria (IBTA) es el Cantón San José de Llanga (Sección Umala), situado a 117 km al Sur-Este de La Paz, entre 17° 23' latitud Sur y 67° 54' longitud Oeste. Otro punto de referencia, estudiado por el Instituto de Ecología (UMSA), ha sido la comunidad de Huaraco, más al Sur, en el cantón Esteban Arce.

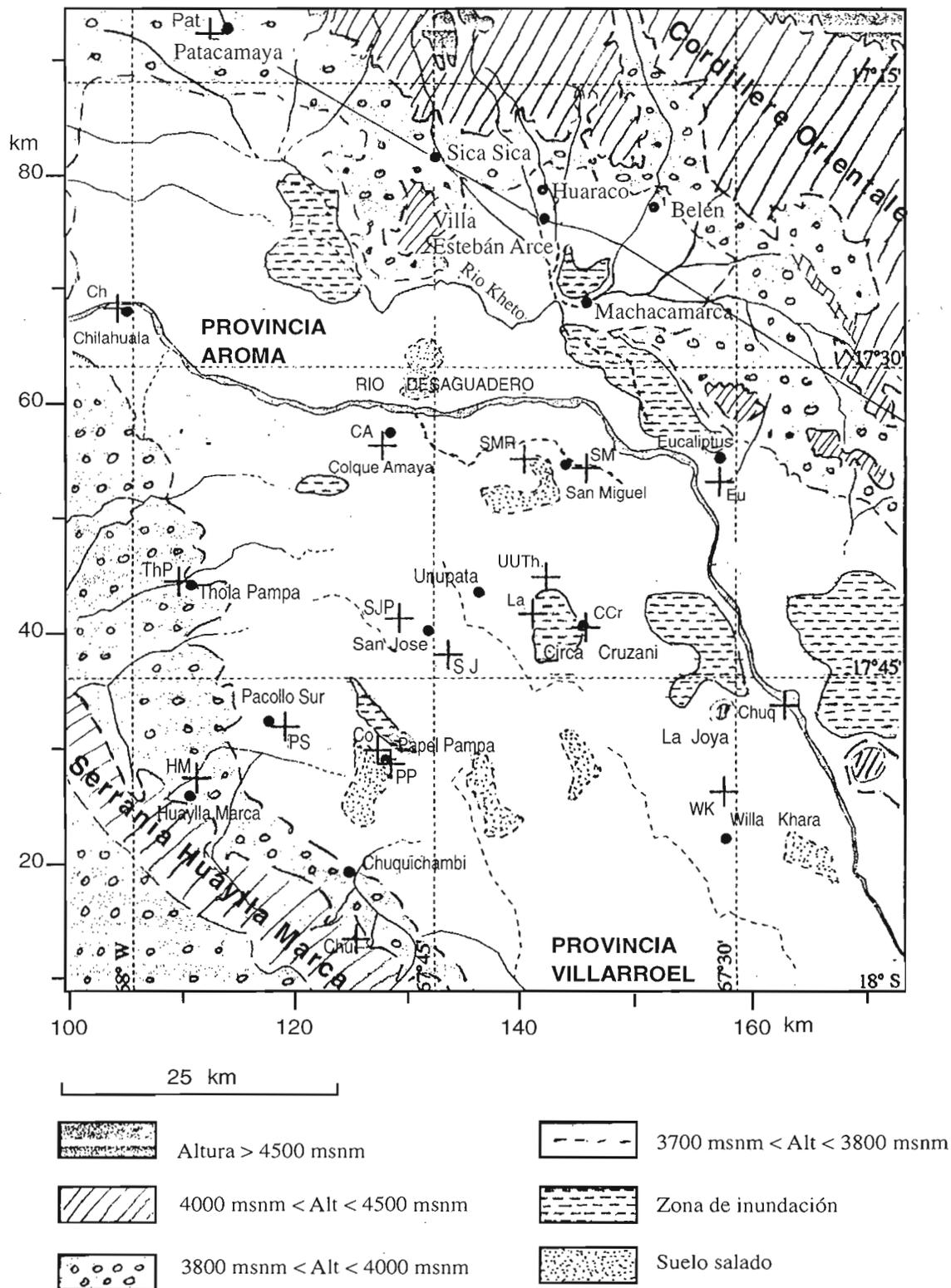


Figura 2.1. La llanura fluvio-lacustre: localización de pueblos y estaciones pluviométricas (Provincias de Aroma y Gualberto Villaruel).

● Localidad, + Posición pluviométrica — Carretera La Paz - Oruro
 Según el mapa IGM 1/250000, 69°W = 0 km X, 18°4 56' S = 0 km Y

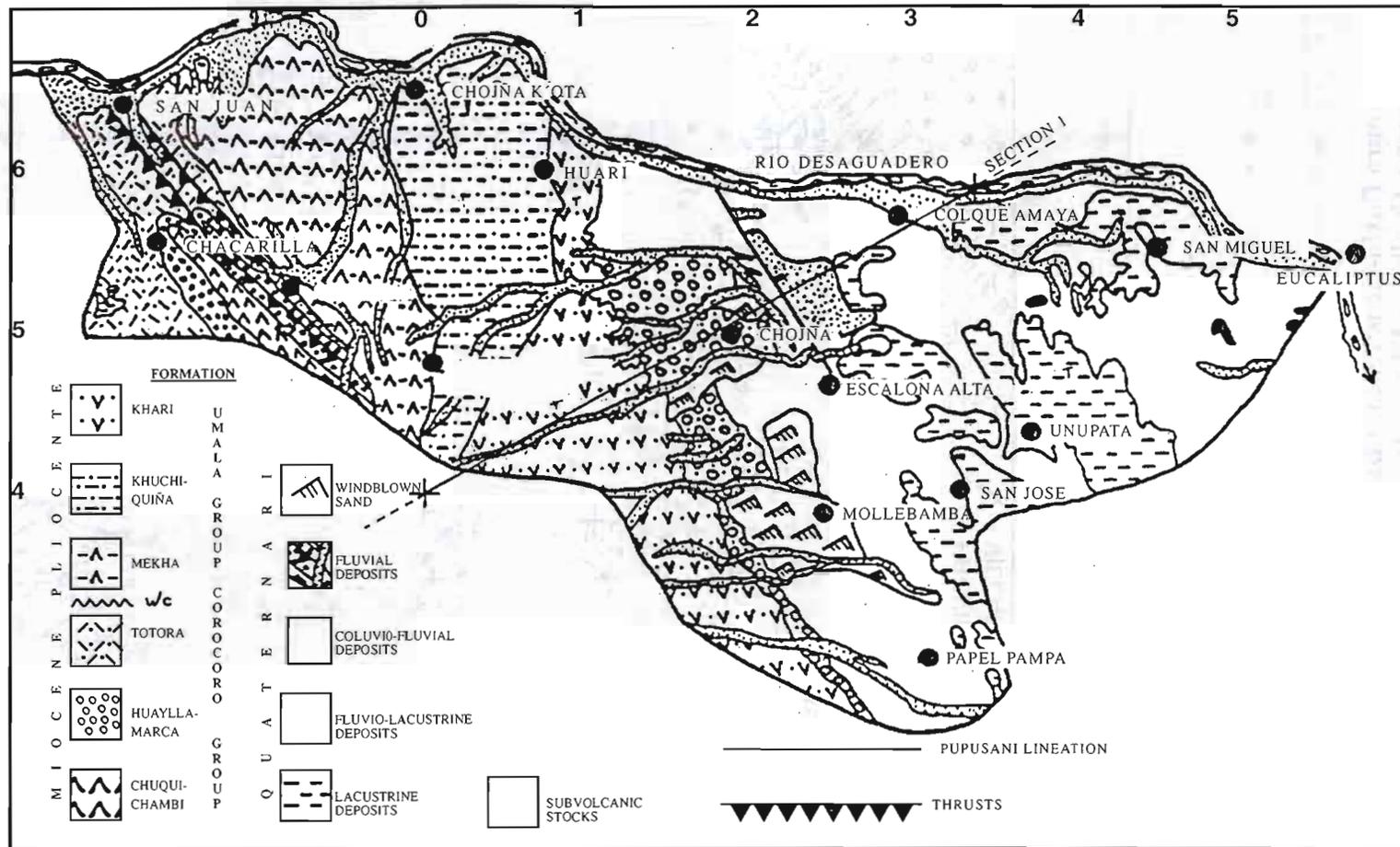


Figura 2.2. Mapa geológico de la provincia G. Villarroel (Riding, 1994)

En el lado occidental, los suelos son franco arcillosos con drenaje imperfecto. El horizonte A es franco arcilloso a arcillo, el horizonte B es franco arenoso y el horizonte C arcilloso. En el lado oriental, los suelos son coluviales de textura franco arenosa y bien drenados con presencia de grava y piedras (hard-pan). El horizonte C se caracteriza por tener cascajo y piedra de origen aluvial. Distinguiremos estos dos contextos, cada vez que se trate del uso de los suelos.

La Llanura fluvio-lacustre del río Desaguadero, que se inicia en las comunidades de Chilahualla (provincia Gualberto Villarroel) y Huari Belén (provincia Aroma) (Fig. 2.1) y se extiende hacia el Sur en el departamento de Oruro (Provincias Tomás Barrón, Cercado y Saucari), hasta el lago Poopó (Figura 1.2), cubre una superficie de aproximadamente 8000 km² (ALT, 1999). Esta planicie, a pesar de sus características climáticas y edáficas adversas, se caracteriza por la presencia de extensas áreas de praderas nativas y artificiales que favorece la crianza de ovinos, vacunos y camélidos, actividad a la cual se dedica gran parte de sus pobladores.

2.2. Clima

Las estaciones climáticas de Eucaliptus (cerrada desde 1982), Chuquiña, Oruro, Colque Amaya, Huaylla Marca, Laruta, Unupata-Union Tholar, Papel Pampa, San José Alto, han sido utilizadas para la provincia de Villarroel y las estaciones de Patacamaya, Sica Sica, Huaraco, Ayo Ayo, para la provincia de Aroma (Figura 2.1).

Los datos climáticos revelan un gradiente de Norte a Sur de la precipitación anual (450 a 250 mm) y de la temperatura promedio anual (11°C a 7°C). Un balance hídrico negativo (ETP>1000 mm año), 8 meses secos y precipitaciones de 250 a 350 mm por año, caracterizan la llanura oriental. Menos de 400 mm de precipitaciones anuales se registran en las partes altas y serranías: 378 mm/año (promedio de 32 años), de diciembre a marzo, y una temperatura media anual que oscila entre 7 °C y 11 °C. La temperatura mínima extrema de 26 °C bajo cero ocurre entre mayo y junio, la máxima de 25°C entre noviembre y diciembre. Las heladas pueden ocurrir durante el ciclo de cultivo, entre el 20 y el 24 de enero y a principios de febrero (Candelaria). Los vientos de julio y agosto pueden llegar a los niveles 9 (75.9 a 83.3 km/h) y 10 (85.2 a 92.6 km/h) en la escala de Beaufort (Ham Papel pampa - Yunta, 1996). Nevadas en los meses de agosto a

septiembre son una gran ayuda para las siembras tempranas de quinua. Granizadas de diciembre a marzo pueden destrozar los cultivos.

2.3. Geología y geomorfología de suelos

Ubicaremos en primer lugar los grandes conjuntos geomorfológicos en la provincia G. Villarroel:

- la primera sección de Villarroel, en la parte occidental de la provincia, es una zona alta de cadena montañosa (3900 a 4000 msnm), que forma parte de las estribaciones de la cordillera occidental y pertenece al complejo de tierras de Callapa. Los suelos de colinas son superficiales.

- la segunda sección de Villarroel, en la parte oriental de la provincia, comprende la llanura fluviolacustre y una zona de transición, el piedemonte a menos de 3900 msnm. La zona baja de estepa (3715 msnm en la parte oriental, 3900 msnm en el Oeste), es susceptible a inundaciones por el río Desaguadero en tiempos de lluvia. Los suelos de planicie son profundos y de permeabilidad lenta a muy lenta en todo su perfil. Por sus características químicas se les considera muy débilmente lixiviados y con una saturación de bases muy alta. De un total de 84 500 ha de esta segunda sección, más de 70% (59 000 ha) es una planicie afectada por diferentes grados de salinidad y/o sodicidad de los suelos.

Registros litológicos de 900 perforaciones, 12 calicatas y 39 barrenadas (Yunta, 1992) han permitido caracterizar las formaciones geológicas e identificar rocas de origen volcánico (ceniza, tuf, lavas, rocas piroclásticas) dentro de los depósitos fluviolacustres (figura 2.2):

- En el sector occidental, la formación Umala, discordante sobre la unidad de la serranía de Huayllamarca de edad terciaria, está compuesta de arcillas margosas y arenitas cremas con intercalaciones de tobas y mantos yesíferos. Estos materiales no resisten a los procesos erosivos; crean paisajes abarrancados (Gumiel, 1988; Jimenez, 1994).

En el sector central, los depósitos cuaternarios discordantes sobre la formación Umala, son constituidos de depósitos eólicos, aluviales y fluviales, coluviófluviales, fluviolacustres y

lacustres, que varían desde gravas a arenas, limos y arcillas. En el sector oriental, son afloramientos paleozoicos e intrusiones diacíticas limitadas hacia el centro de la zona de estudio por la falla de Coniri. La formación Chacarilla está compuesta de lutitas yesíferas rojas y rosadas; la formación Huayllamarca, de areniscas rojas bien consolidadas, localmente conglomeráticas; la formación Totorá de areniscas y lutitas anaranjadas deleznable, localmente yesíferas con algunos mantos de tobas y la formación Mauri de conglomerados y areniscas tobáceas blanquesinas y cremosas.

2.4. Vegetación

Las asociaciones vegetales de la segunda sección de la provincia Gualberto Villarroel han sido mapeadas por Moreau en 1992 al 1/250 000 (Figura 2.3) y estudiadas por Alzerreca & Lara (1987), Alzerreca & Prieto (1990), Ham Papel Pampa - Yunta (1996), Yunta (1997, 1998c):

Gramadal: *Distichlis humilis*, *Mulhenbergia fastigiata*

Q'otal: *Anthobryum triandrum*, *Junnellia minima*

Pastizal (de tipo pajonal): *Calamagrostis heterophylla*, *Stipa ichu*, *Hordeum muticum*, *Festuca orthophylla*, *Tetraglochin cristatum*

Tholar: *Parastrephia lepidophylla*.

Un total de 32 transectos de inventario botánico fueron levantados en Gualberto Villarroel entre marzo y abril 1998, en una superficie de 60 000 ha. La cifra de 45% de especies forrajeras deseables es similar a la cifra de Jerez (1991), con 10 especies de gramíneas, 2 especies de Compositaceae (Verneria y Senecio), 1 especie de Amaranthaceae, Cactaceae, Cariophyllaceae, Chenopodiaceae, Convulginaceae, Leguminosae, Malvaceae, Rosaceae, Scrophulariaceae, Verveneaceae.

Las canapas han sido ampliamente estudiadas en el cantón de San José de Llanga (provincia de Aroma). Según Massy & Valdivia (1995), 48% de sus 7 200 ha están constituidas por 4 grupos vegetales:

- Q'otal-Q'auchial (*Anthobryum triandrum*, *Salicornia pulvinata*, *Atriplex cristata*), en la zona de Choconimaya, al SudOeste de la comunidad, donde el suelo es más salino por la influencia del río Desaguadero (Foto 2.1);

- Gramadal (*Distichlis humilis*, *Mulhenbergia fastigiata*), especies con poca biomasa y alto contenido de fibra;
- Pajonal (*Calamagrostis curvula*, *Festuca dolichophylla*, *Hordeum muticum*);
- Tholar-Pajonal (*Parastrephia lepidophylla*, *Tetraglochin cristatum*, *Festuca orthophylla*, *Stipa ichu*), mayormente donde la napa freática supera los 4 metros de profundidad (Céspedes *et al.*, 1995).

De las 17 familias botánicas inventariadas, 27% son Poaceae, 20% Compositae, 9% Cyperaceae, 7% Leguminosae.

Garabito *et al.* (1995) analizan en San José de Llanga la relación entre vegetación nativa (q'auchial caracterizado por *Salicornia pulvinata*, q'otal caracterizado por *Anthobryum triandrum*, gramadal caracterizado por *Distichlis humilis*) y suelos salinos. *Salicornia pulvinata* es una especie halófito obligada que se desarrolla mejor en áreas de alta salinidad ($CE = 46-76 \text{ mS.cm}^{-1}$), y con napa freática de agua salada a poca profundidad. A medida que el pH aumenta, la sensibilidad hacia la CE aumenta. Coberturas de *Anthobryum triandrum* superiores a 40% en suelos con $CE < 5 \text{ mS.cm}^{-1}$ indican que esta especie es una halofita facultativa. Su cobertura baja drásticamente a CE superior a 22 mS.cm^{-1} y se encuentra limitada por la textura fina y la napa freática superficial. Es susceptible a periodos prolongados de encharcamiento. La cobertura de *Distichlis humilis* disminuye en suelos con $CE > 26 \text{ mS.cm}^{-1}$; tiene tolerancia moderada a la salinidad del suelo. Es favorecida por textura pesada y napa freática superficial, pero limitada por pH elevado. El q'auchial se está extendiendo en detrimento del q'otal y del gramadal para colonizar el erial.

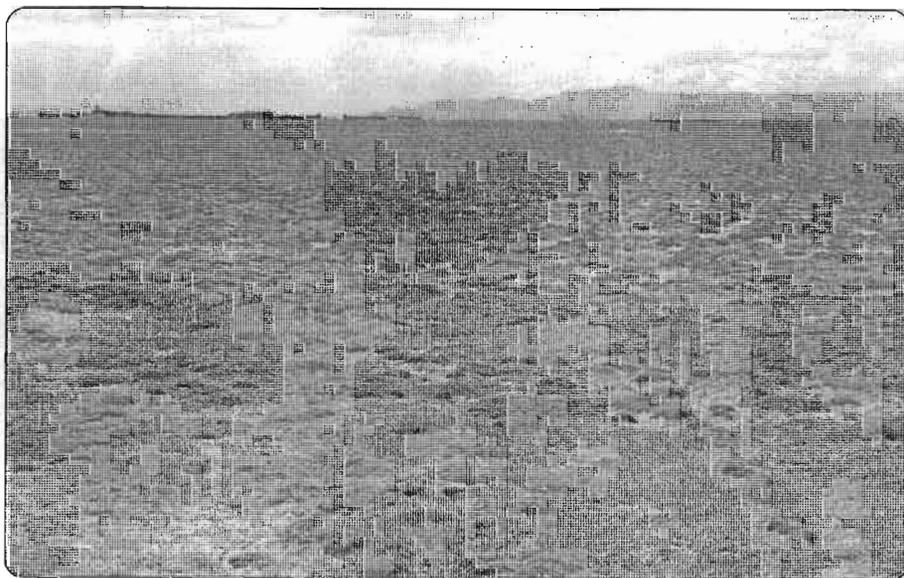
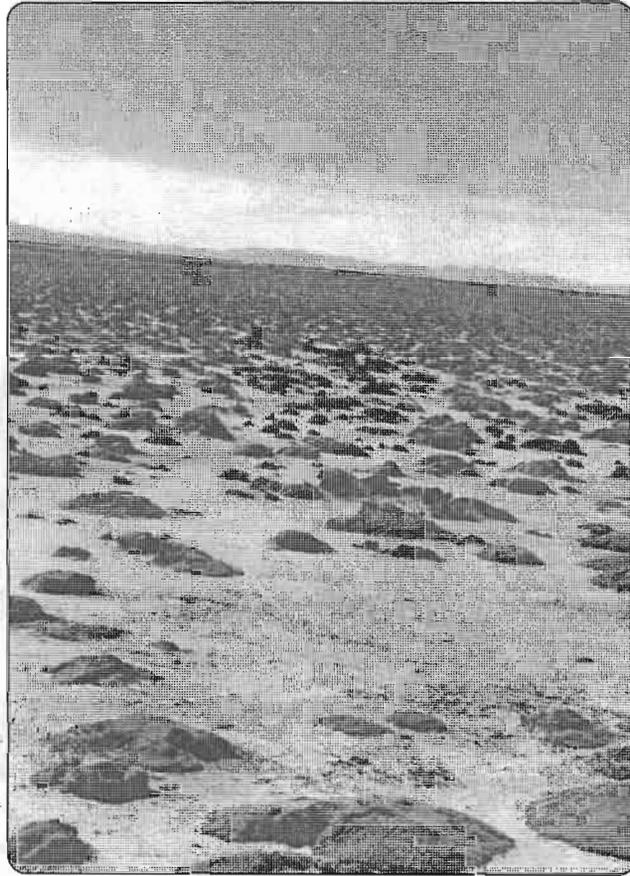


Foto 2.1. Formaciones vegetales con khotal: *Anthobryum triandrum* (Ledezma).

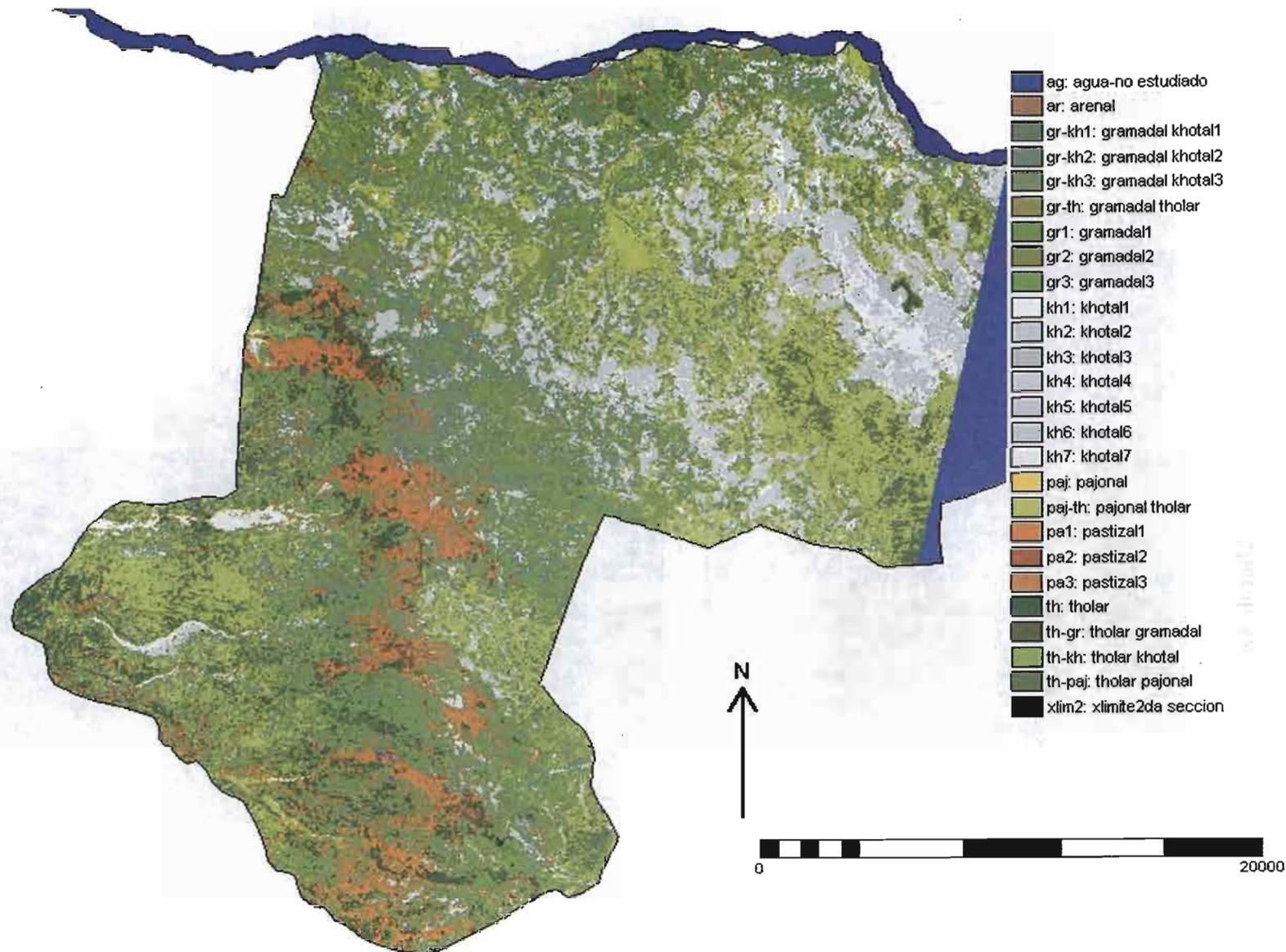


Figura 2.3. Mapa de vegetación, segunda sección de la provincia G. Villarreal (1/200 000), (Imboff & Loza, 1998)

2.5. Actividades productivas

La provincia G. Villarreal cuenta con 193 500 ha (1935 km²), 0.08 hab/km², 35 Co campesinas, 29 000 ha cultivables, 41 000 ovinos, 100 alpacas, 92 000 llamas (IBTA-SIPAB, 1992). La actividad económica principal de los habitantes de la región es la pecuaria. Los pobladores crían el ganado ovino, a cargo principalmente de las mujeres, y en menor proporción ganado vacuno, generalmente de razas criollas, y con un sistema de manejo tradicional sin tratamientos preventivos y/o curativos, salvo un baño antisarnico anual en algunas comunidades (Ham Papel Pampa - Yunta, 1996). El ganado ovino es en su mayoría criollo; normalmente el peso vivo del animal adulto varía entre 15 y 20 kg, correspondiente a un peso en carcasa de 7 a 10 kg. La explotación es de tipo extensivo ya que una familia tiene como promedio 30 a 80 ha y cría aproximadamente entre 100 a 200 ovinos con pastoreo directo. El ganado ovino se destina al autoconsumo y a la venta. Se estima en el primer caso una extracción anual promedio de 18 unidades ovinas/flia/año. En el caso de la venta, que se realiza en circunstancias especiales como épocas de siembra, fiestas, viajes, en los meses de agosto, octubre y enero, se estima la saca a 5 unidades ovinas, 4 veces al año, haciendo un total de 20 unidades al año. El total de explotación de 38 UO por año representa un porcentaje anual de saca de 20 a 40% en función de la comunidad y de la cantidad del ganado. Esta cifra indica una acumulación innecesaria de ganado que contribuye además a la degradación de las praderas.

La provincia Aroma cuenta con 451 000 ha, 0.15 hab/km², 220 Comunidades campesinas, 67 670 ha cultivables, 20 000 bovinos, 243 000 ovinos (IBTA-SIPAB, 1992). La actividad económica es en este caso agropecuaria, combinando la cría de ovinos con la ganadería bovina que tiende a una especialización lechera, en base a forraje de cebada y de manera creciente, alfalfa.

3. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA SALINIDAD

En razón de que las aguas del río Desaguadero se constituyen en una de las únicas fuentes de agua disponible para consumo humano, animal y riego, en gran parte de la llanura fluvio-lacustre, es necesario evaluar su calidad. Esta calidad se aprecia por el contenido del agua en sales, en boro, en metales pesados, y por su carga en sedimentos.

Para entender el origen y la gravedad de la salinidad de las aguas disponibles en el altiplano central, es necesario separar los recursos hídricos superficiales y subterráneos; su calidad es distinta y existen flujos entre estos dos compartimientos.

3.1. Recursos hídricos superficiales (R. Ledezma, D. Hervé)

3.1.1 Río Desaguadero

El Altiplano boliviano es drenado por el río Desaguadero, salida del lago Titicaca (3810 msnm) y tributario del lago Poopó (3686 msnm). Se origina en el lago Titicaca que constituye una reserva considerable de agua (8 448 km², 937 km², 100 m de profundidad en promedio, según Carmouze et al., 1983), alimentada por una cuenca vertiente de 56 270 km². La mayoría de los aportes al lago (afluentes y precipitación media sobre el espejo de agua) se evapora, dejando fluir por el río Desaguadero el caudal excedente, generalmente débil, que representa menos del 10% del de los afluentes al lago y 1.5% de las pérdidas totales de agua (Carmouze *et al.*, 1978). Este caudal está correlacionado con el nivel del lago. El volumen neto de agua que sale del lago por el Desaguadero fue por ejemplo de 0,056 10⁹ m³ en 1969-70, año de aguas bajas y de 1,12 10⁹ m³ en 1964-65, año de aguas altas. Después de un recorrido de aproximadamente 270 km y abajo de Chuquiña, el río Desaguadero se separa en dos brazos, para finalmente alimentar a los lagos Uru Uru y Poopó, que se comunican entre ellos, a una altura de 3670 msnm. La región sureste de la cuenca está sometida a inundaciones durante la estación de lluvias, en razón de la reducida pendiente (0.04%) del sistema fluvio lacustre. Este sistema es cerrado, con varias entradas, pero sin efluentes hacia otras cuencas.

Con datos de 1964-1978, Carmouze *et al.* (1981) demuestran que la salinidad de las aguas del lago Titicaca proviene de la erosión química de formaciones volcánicas y sedimentarias, la salinidad de sus tributarios varía entre 5 y 20 mM.l⁻¹. Pero la composición química de las aguas del lago es muy estable, a pesar de la variabilidad de los aportes en agua y sales disueltas; la renovación anual de las sales mayores está comprendida entre 0.2% (Na y Cl) y 0.5% (Ca y HCO₃/CO₃) en el lago mayor y 1.6-1.7% (Na, Cl), 6.5-7.2% (HCO₃/CO₃, Ca) en el lago menor.

Refiriéndose a la composición química del agua, el Desaguadero evacúa solamente 11.4% de los aportes fluviales en sales disueltas (cuadro 1).

Cuadro 1. Composición química de las aguas del Desaguadero

Sales	HCO ₃ /CO ₃	SO ₄	Cl	Na	K	Ca	Mg	SiO ₄ H ₄
mM.l ⁻¹	1.90	2.65	7.95	8.55	0.445	1.53	1.50	0.0125

Las aguas del lago, como resultado de la evaporación, son más concentradas que sus tributarios; su concentración en sales disueltas se sitúa en promedio alrededor de 700 mg l⁻¹. Según Iltis *et al.* (1991), la conductividad eléctrica del agua a 25°C varía según la localización y el mes del año entre 1.343 μS.cm⁻¹ y 1.521 μS.cm⁻¹. El contenido de sales disueltas es cercano a 1 g l⁻¹. Las aguas presentan una fase cloro-sulfatada sódica (Na>Ca>Mg>K). El contenido relativamente alto en sales disueltas es atribuido a la fuerte erosión en la vertiente de la cuenca. Este contenido queda estable, por el largo tiempo de permanencia de las aguas en el lago. El contenido en sales obliga a definir reglas precisas del uso agrícola para evitar una salinización de los suelos.

El caudal del Desaguadero está estimado en 60 m³.s⁻¹ como promedio anual a la altura de Eucaliptus (Gumiel, 1988, citado por Moreau, 1992). Según Carmouze *et al.* (1978), Bourges *et al.* (1991), Gárfias *et al.* (1995), el Desaguadero debería poder dotar un caudal reservado que por lo menos evite una salinización de este río por sus afluentes aguas abajo, en caso de agotamiento de los caudales procedentes del lago, y ser regulado para evitar los caudales en exceso responsables de inundaciones y de descargas adicionales. Es difícil imaginar la extracción de 500 a 1000 m³ s⁻¹ por la única desembocadura del lago, el río Desaguadero, cuando el caudal máximo a la salida del lago varía entre 300 y 350 m³ s⁻¹ con una recurrencia centenaria. Un pronóstico de crecidas permitiría manejar las reservas de volumen del lago para que pueda absorber aportes excepcionales superiores a los 2000 m³ s⁻¹ durante un mes con una tasa de descarga de 300 m³ s⁻¹. La construcción de embalses en tributarios o en el mismo Desaguadero está diseñada para evitar las consecuencias de las crecidas excepcionales. Ya que el lago Titicaca forma parte de un sistema endorreico, es preciso tener en cuenta las consecuencias que podrían ocasionar, río abajo, en el lago Poopo y eventualmente en el salar de Coipasa, la inyección o la retención de

volúmenes de agua importantes, permitidas por una regulación de las salidas del lago (Bourges *et al.*, 1991).

Gárfias *et al.* (1995) han aplicado un modelo para determinar las crecidas del río Desaguadero, con la finalidad de evitar las catástrofes naturales que ocurrieron en los últimos años, con las fluctuaciones de nivel del Lago Titicaca. Una etapa de análisis y de depuración de los datos disponibles (Llamas *et al.*, 1994) ha permitido detectar la presencia de un componente residual que dió lugar a suponer una interacción entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas, en la región comprendida entre la estación de Ulloma y la de Chuquiña. Esta hipótesis ha sido desarrollada en las investigaciones de Coudrain-Ribstein *et al.* (1995).

Para verificar los efectos del flujo subterráneo o de la evaporación, se observó que para los años hidrológicos 1980-1981 la diferencia de caudal es positiva, contrariamente a la del año hidrológico 1977-1978 donde la diferencia es negativa para ciertos períodos. Esto implica indudablemente para diferencias positivas, la existencia de aportes superficiales hacia el río Desaguadero y cuando se observan diferencias negativas, un efecto de evaporación asociado a aportes hacia el acuífero. Las condiciones de humedad del suelo, así como la recarga de la capa subterránea, constituyen factores muy importantes dentro la hidroquímica del río Desaguadero.

Casi la totalidad de las crecidas de la región se inicia en el mes de diciembre hasta el final del mes de mayo. Sin embargo, hay que distinguir dos tipos de crecidas, aquellas causadas por las precipitaciones (diciembre-marzo) y las crecidas asociadas a las fluctuaciones de nivel del lago Titicaca (abril-mayo).

Para evaluar las crecidas del río Desaguadero se utilizó un modelo sobre la base de la relación precipitación - caudal (Modelo HEC-1) y se constató que el criterio más interesante para la calibración ha sido introducir las pérdidas de caudal en el tramo comprendido entre las estaciones de Ulloma y Chuquiña. De esta manera, en lugar de considerar solamente el aporte superficial, se propone la adición de una función de pérdidas de caudal.

El tratamiento general de los diversos datos integrados a la modelación ha permitido obtener una primera síntesis de las crecidas que aquejan esta región. En virtud de los resultados obtenidos, existe una disminución importante de caudal en el caso de algunas crecidas en el tramo comprendido entre las estaciones de Ulloma y Chuquiña, que dependen de las condiciones de humedad antecedente, de las características geológicas de la región y de las tasas de evaporación. Dos hipótesis se desprenden de esta observación: la primera sostiene una influencia neta de la recarga hacia la capa subterránea y la segunda supone una combinación de esta última con la evaporación. Ambas demuestran las interacciones entre aguas superficiales y subterráneas.

3.1.2. Regulación del sistema TDPS

El proyecto binacional Perú-Bolivia dedicado al lago Titicaca (PELT) tenía como sub-programa de estudio el sistema TDPS constituido por los lagos Titicaca, Poopó, el río Desaguadero y los salares. Bourges *et al.* (1991) dan algunos elementos de un balance global de la oferta de agua y de las demandas.

Varios proyectos de perímetros irrigados están en ejecución:

- 18 600 ha están en ejecución en territorio peruano, de las que 6 500 ha ya funcionan, pero de manera irregular (Ministerio de Agricultura, Perú, 1986);
- 5 000 ha están irrigadas a partir de aguas superficiales del lado boliviano, cerca de Huarina, y 8 800 ha están en proyecto, utilizando aguas subterráneas.

La comunidad europea (PAC II, 1996) ha promovido dos proyectos de riego:

- 20 000 ha del proyecto Chilahuala, sobre un total de 99 000 ha, en ambas márgenes del río Desaguadero, en los cantones de Umala y Lahuachaca (Segunda sección de la Provincia Villaroel, La Paz).
- 6 600 ha sobre un total de 17 000 ha en El Choro (Provincia Cercado, Oruro), en una planicie al Oeste de los lagos Uru Uru y Poopó. Este proyecto de riego se desarrolla sobre el más antiguo sistema de riego campesino de la zona, iniciado en 1953.

Considerando un período de riego de 5 a 6 meses (octubre a marzo), con un coeficiente de eficacia de 50%, las necesidades brutas de agua pueden evaluarse según las precipitaciones alrededor de 1 500 a 2 000 m³ por ha y por mes. En esta hipótesis, y si sólo se utilizan las aguas

de superficie, las áreas susceptibles de próximo uso o en funcionamiento utilizarían la totalidad de los recursos de la opción mínima ($315 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$). Una pequeña parte, correspondiente al drenaje, sería restituida a la red. Incluso con una utilización conjunta de las aguas subterráneas, es probable que los aportes al lago en octubre, $35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para el conjunto de la cuenca, no puedan cubrir las necesidades cada año. Con las mismas bases de cálculo, el conjunto de las superficies irrigables (del orden de $200\,000 \text{ ha}$) exigiría, en año seco, $2 \times 10^9 \text{ m}^3$, una parte de la cual sería restituida, pero cerca de 1 billón de m^3 sería utilizada por las plantas. Este volumen representaría, algunos años, una extracción muy importante frente a los aportes fluviales al lago.

El agua potable regresa en general a la red, después de su uso. Del lado peruano, cementeras, producción térmica y sector agro-alimentario preocupan más por la polución eventual que por la importancia del consumo que inducen. Del lado boliviano, el consumo es rural, industrial (la fábrica de cemento de Viacha), y urbano: 70% del aprovisionamiento de La Paz provienen de la cuenca del lago ($32 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$) y de bombeos importantes en las capas de la cuenca ($11 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$). En la parte boliviana de la cuenca, se presentan serios problemas de calidad del agua (Quintanilla *et al.*, 1991, 1995; Camacho & Quintanilla, 1994). Estos autores, a partir de muestras colectadas en el sistema TDPS entre 1989 y 1993, y datos de 30 pozos de la provincia de Aroma, aseveran que (1) la acumulación de metales pesados es un problema en el lago Poopó, (2) el saneamiento a la salida del sistema de desagüe de Oruro es defectuoso (contaminación antrópica), (3) existe contaminación natural (Arsénico, Sílice disuelta, Cloruros, Sulfatos, Sodio, Calcio y Boro) en el Sur de la cuenca, en el área de Oruro y en el área rural (Wolfram, Estaño, Cobalto, Cadmio, Níquel, Antimonio, Plomo).

En aguas superficiales, los valores de estaño (0.1 a $0.8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$), de wolfram (0.3 a $7.2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$), se hallan por encima del límite apto para consumo humano. Todos los metales pesados hacen el agua de los lagos Uru-Uru y Poopo no apta para cualquier uso. Diversos autores como Quintanilla (1983), Carmouze *et al.* (1987), PHICAB-UMSA (1988), PELT (1993), señalan que a medida que las aguas del río avanzan hacia el sur del Altiplano, los contenidos de metales pesados (Cadmio, Plomo, Arsénico, Mercurio, Cobalto, Níquel, etc.) se van incrementando. Así mismo las concentraciones de cloruros, sulfatos y carbonatos de Ca, Mg y Na aumentan paulatinamente desde el lago Titicaca hacia el Poopó, hasta alcanzar aproximadamente 3 g por litro. Este

incremento de las sales en las aguas de la cuenca del Desaguadero, se debe en primer lugar a las formaciones atravesadas por el río. Atraviesa entre los sectores de Aguallamaya y Ulloma una vasta región del terciario, conformada de estratos yesíferos de las formaciones de Jalluma, Pando, Ballivian, Totorá, las que luego de su mineralización aportan importantes cantidades de sales de diferentes cationes. Por otro lado, las sales acumuladas en las capas superficiales de los suelos durante la época seca del año son lavadas por las lluvias hacia los ríos y quebradas, acumulándose posteriormente en la parte baja de la cuenca del Desaguadero.

En aguas subterráneas, algunos pozos presentan valores superiores a lo permitido en sulfatos, cloruros, boratos, sodio, fierro. El río Desaguadero no es apto para riego aguas abajo de Calacoto. Es importante subrayar el papel regulador del río Mauri sobre la evolución de la salinidad de la cuenca. En general, las aguas subterráneas muestran mejores características físico-químicas que las aguas superficiales.

3.2. Recursos hídricos subterráneos y salinidad

La salinidad directamente apreciable en el altiplano boliviano es la del salar de Uyuni. Risacher & Fritz (1995) explican que este salar proviene del desecamiento hace diez millones de años de un lago salado de 45 000 km² y 80 m de profundidad, llamado lago Tauca. Son una decena de lagos salados que ocuparon el Altiplano central durante el Cuaternario, reflejando las oscilaciones climáticas y los episodios sedimentarios. Antes de proponer manejos actuales de suelos salinos, aguas arriba de este salar, no es inútil tener una comprensión global del origen de la salinidad, en el conjunto del Altiplano y desde el pasado lejano. Datos y simulaciones hidrogeológicas permiten proponer la hipótesis que esta salinidad tiene relación con los mecanismos que vinculan agua subterránea, paleolagos y suelos.

3.2.1. Cambios climáticos y reciclaje durante varios millares de años del cloruro entre lagos y agua subterránea, ejemplo del Altiplano boliviano ¹ (A. Coudrain, A. Talbi, E. Ledoux, P. Ribstein, G de Marsily)

(1) Este texto es la traducción al castellano del artículo publicado en francés en el IAHS redbook:

Coudrain A., Talbi A., Ledoux E., Ribstein P. & de Marsily G., 2000. Contribution of Cl transport modeling to the knowledge of the evolution of hydrological conditions over several thousand years, review and example of the Altiplano. In: Tracers and modeling in hydrogeology (ed. A. Dassargues), Liège, Belgique, 23-26 mai, IAHS Pub. 262, 409-416.

Esta investigación contó con el apoyo financiero del CNRS, del IRD-Orstom y, en Bolivia, del Programa Nacional de Investigación en Hidrología. Los autores agradecen al Centro Nacional de Investigación Geodinámica de Thonon (France) y a las instituciones bolivianas SENAMHI e IHH por su contribución en la adquisición de datos analíticos y de campo.

Introducción

Las cuencas endorreicas no tienen exutorio hacia el océano y se hallan sobre todo en las zonas áridas. Presentan un punto bajo ocupado por un lago o una costra de sal. Un trabajo de síntesis (Langbein, 1961) muestra que la salinidad de los lagos de dichas cuencas es notablemente inferior al valor estimado, teniendo en cuenta el aporte de sal acumulada desde su origen. Según

la explicación presentada por Rogers & Dreiss (1955), la sal se infiltra hacia el medio subterráneo durante las fases de alto nivel de agua del lago. Por otra parte, se admite que el funcionamiento general en período seco es el siguiente: infiltración de agua dulce en las zonas de piedemonte, evaporación y acumulación de sal cerca del punto bajo de la cuenca que tienen como consecuencia la formación de células convectivas (Duffy & Al-Hassan, 1988). Existen varios estudios sobre la caracterización de estas células y la localización del límite entre agua dulce y agua salada, el mismo que depende de las condiciones climáticas (e.g. Fan *et al.*, 1997).

El presente estudio trata sobre la cuenca del Altiplano que cubre 190 000 km² del medio andino. Esta meseta alta está situada entre cordilleras que culminan a más de 4 500 m.s.n.m (Figura 1) y comprende varios relieves internos. Se puede dividir esta cuenca endorreica en dos subcuencas, la del lago Titicaca al norte y la del salar de Uyuni al sur. La subcuenca sur fue cubierta en gran parte por el paleolago Tauca hace alrededor de 12 000 años (12 ka A.P.). El estudio abarca 3 550 km² de una zona aguas arriba de esta subcuenca sur, donde se consiguieron numerosos datos hidrogeológicos que proporcionaron la materia para una modelización del transporte del cloruro durante 11 000 años.

Funcionamiento hidrogeológico actual

El acuífero estudiado (Figura 3.1) está formado esencialmente de sedimentos fluviolacustres subhorizontales del Cuaternario. Se limitó la zona de estudio a 3 550 km², sobre los cuales fueron obtenidos los datos. El límite rectilíneo del sur es artificial. Los demás límites externos del área corresponden al contacto con relieves constituidos de rocas más antiguas de escasa permeabilidad. El río Desaguadero es el único efluente del lago Titicaca y constituye un límite hidráulico del acuífero estudiado. La lluvia anual es del orden de los 350 mm y se concentra entre diciembre y febrero. La evaporación potencial anual de una superficie de agua libre es del orden de los 1 500 mm (Vacher *et al.*, 1994). La profundidad de los pozos en la capa freática varía entre 20 m y 80 m. Se nivelaron cuarenta y seis de ellos a fin de obtener una precisión de algunos decímetros para la piezometría.

Se ha realizado una modelización hidrogeológica con el modelo NEWSAM (Ledoux & Levassor, 1993) para dar cuenta del funcionamiento actual de la capa freática. En zona árida el flujo evaporatorio a partir del acuífero (Figura 3.2) puede ser descrito por la siguiente relación (Coudrain-Ribstein *et al.*, 1998) introducida en el modelo:

$$E = 65 (\pm 7) Z^{-1.5} \quad (1)$$

Con valores de transmisividad de 5×10^{-4} a $10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, los términos del balance establecido por la modelización son: infiltración cerca de los piedemonte de $24 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$, alimentación neta por el Desaguadero de $18 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$, flujo evaporatorio a partir del acuífero de $29 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$, flujo hacia el sur de $13 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$.

Concentración en cloruro

La concentración en cloruro del agua subterránea varía en el espacio. Es del orden de la de la lluvia cerca de las zonas de infiltración ($0,5 \text{ mmol l}^{-1}$) y del orden de la del Desaguadero cerca de este río (10 mmol l^{-1}). En cambio, existe una zona de agua salada en la capa en el sector sureste con concentraciones de 20 a 165 mmol l^{-1} . Además, los suelos son muy salados al este de la zona de estudio por ambos lados del Desaguadero, como lo muestran las imágenes LANDSAT y SPOT de 1991 y las extracciones de muestras en la zona no saturada (10 a $20 \text{ kg de Cl m}^{-2}$).

La concentración de Cl del paleolago Tauca hace 12 000 años y para una altitud del nivel de agua del orden de los 3 760 m, puede ser estimada en unos 20 g l^{-1} , según los balances de sales de los salares (Risacher & Fritz, 1991).

Condiciones hidrológicas durante el holoceno

La última fase lacustre Tauca duró varios miles de años y presentó su máximo nivel de agua alrededor de los 3 760 m, hace 12 000 años (Bills *et al.*, 1994; Seltzer *et al.*, 1995; Servant *et al.*, 1995; Mourguiart *et al.*, 1997; Sylvestre *et al.*, 1999). La mayor parte de la zona de estudio tiene una altitud comprendida entre 3 760 m y 3 700 m y fue cubierta muy probablemente por el lago Tauca. Hace alrededor de 11 ka A.P., el lago en fase de desecación ya no cubría esta zona.

Se ha utilizado la evolución de los niveles del lago Titicaca para reconstituir la evolución de las lluvias en 11 ka (Figura 3.3). Actualmente, son de 750 mm an^{-1} en la cuenca del Titicaca en su conjunto. Según esta reconstitución habrían sido de $20 \pm 2\%$ inferiores durante el período árido de 10 ka a 4 ka A.P. (Talbi *et al.*, 1999), teniendo en cuenta niveles del lago de 50 a 100 m más bajos que actualmente (Cross *et al.*, 2000). Al tener el lago Titicaca un nivel por debajo de los 3 804 m entre 10 y 2 ka A.P., el Desaguadero no era alimentado por el lago cuyo nivel de agua era más bajo que el límite de desagüe (Mourguiart *et al.*, 1997).

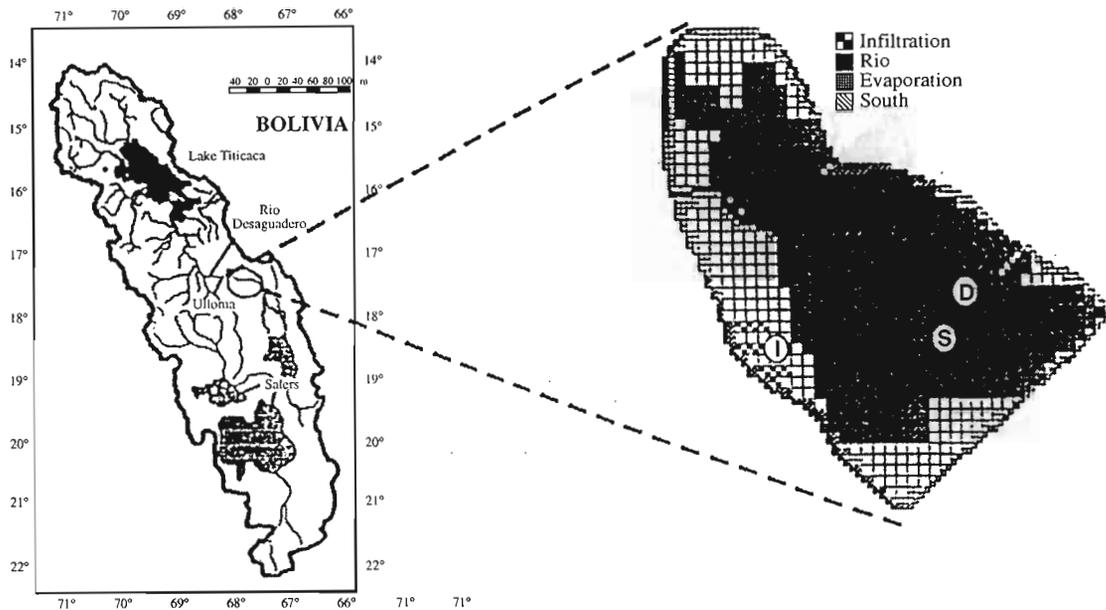


Figura 3.1. Zona estudiada en el Altiplano boliviano (Coudrain *et al.*, 2001)
 La zona de estudio cubre 3,550 km² al Norte de la sub-cuenca Sur del Altiplano. El Desaguadero es el único efluente del lago Titicaca y el único flujo superficial permanente, en las condiciones hidrológicas actuales, que atraviesa la zona en estudio. Están localizadas las mallas (S), (D), (I) del acuífero.

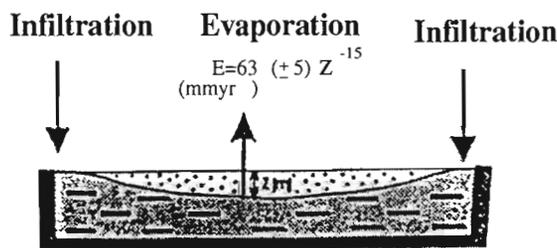


Figura 3.2. Flujos de evaporación e infiltración (Coudrain *et al.*, 2001)
 En zona arida, las napas freáticas están alimentadas por infiltración del escurrimiento a través de superficies reducidas, en los bordes del acuífero. El principal flujo que sale está relacionado a la evaporación que concierne a las superficies cuyo nivel de agua queda a menos de 20 metros debajo de la superficie del suelo.

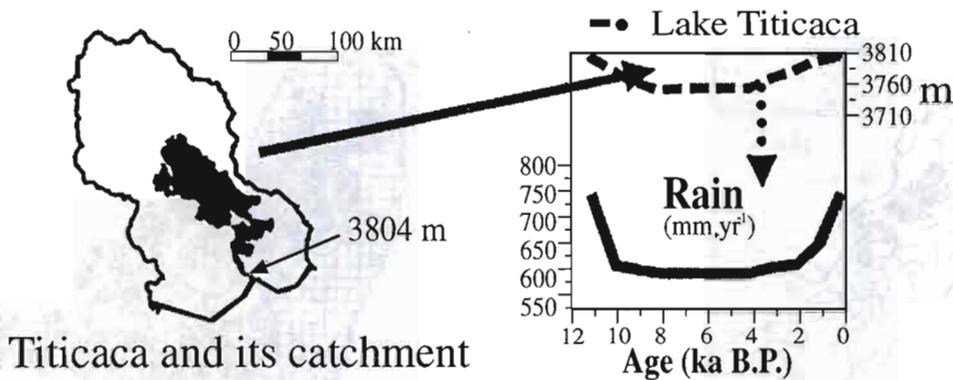


Figura 3.3. Evolución de los niveles del lago Titicaca (Coudrain *et al.*, 2001)
 La evolución de los niveles de agua del lago Titicaca permite de calcular las precipitaciones durante el Holoceno sobre el conjunto del sub basin Norte del Altiplano

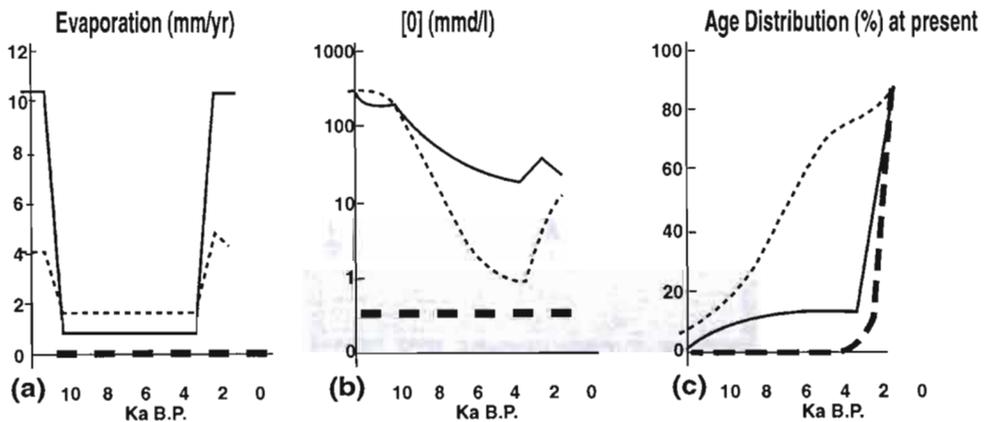
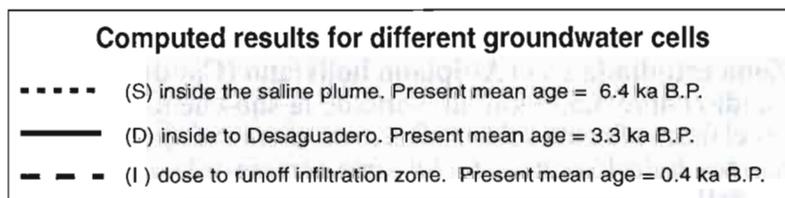


Figura 3.4. Resultados del modelaje transitorio en 11000 años (a) de los flujos de agua, (b) del cloruro, (c) de la edad (Coudrain *et al.*, 2001)
 La situación de las mallas (S), (D), e (I) del acuífero en la figura 1. Desde el presente, la edad media del agua en estas tres mallas es, respectivamente de 6400 años, 3300 años y 400 años

Modelización transitoria durante 11 000 años

Las modelaciones de flujo de agua y de elementos químicos en la capa freática fueron realizadas en transitorio para 11 000 años. Estas modelaciones utilizan las condiciones en los límites reconstituidas para el pasado, basadas en el conocimiento del funcionamiento actual, o sea: (a) las condiciones iniciales (11 ka A.P.) corresponden al comienzo del período postlacustre con concentraciones en cloruro en el agua subterránea de alrededor de 10 g l^{-1} debajo del antiguo lago; (b) el Desaguadero es considerado seco de 10 a 2 ka A.P.; (c) desde 11 ka A.P., las zonas de infiltración y las concentraciones que se les asignan son las mismas que para el periodo actual, pero las cantidades infiltradas evolucionan en el tiempo proporcionalmente a las lluvias reconstituidas en la cuenca del Titicaca.

Se ha fijado el espesor del acuífero en 100 m aguas arriba y en 50 m aguas abajo, según las prospecciones geoelectricas y los primeros resultados de prospección TDEM (Guérin *et al.*, 1999). Se ha escogido el valor de la porosidad en 0,35, según los datos granulométricos.

Los valores iniciales de concentración de cloruro son de $0,5 \text{ mmol l}^{-1}$ cerca de las zonas de piedemonte y de 280 mmol l^{-1} más allá. Así, la simulación comienza con un contenido de 500 millones de toneladas de cloruro en solución en el acuífero y ninguna cantidad de cloruro en la zona no saturada que está encima del acuífero.

La modelización se efectúa al paso de tiempo anual en 11 000 años. En cada paso de tiempo se resuelven tres ecuaciones. La primera simula los flujos de agua con una sucesión en régimen casi permanente correspondiente a las condiciones del paso de tiempo considerado. La segunda simula la convección en régimen transitorio del cloruro en solución y calcula el flujo de cloruro hacia la zona no saturada. La tercera permite calcular la edad promedio del agua desde su infiltración. Esta última ecuación presentada en Goode (1996) ha sido agregada al modelo hidrogeológico NEWSAM.

Los resultados muestran que durante la fase árida entre 10 ka A.P. y 2 ka A.P. el nivel piezométrico baja y el flujo evaporatorio disminuye. Así, para la malla D situada en el centro de la zona de estudio, este flujo pasa de 12 mm an^{-1} en 10 ka A.P. a menos de 2 mm an^{-1} en 2 ka A.P., debido al hundimiento de la superficie libre de la capa (Figura 3.4a).

La modelización del transporte de cloruro muestra que al final del período árido sin caudal en el Desaguadero en 2 ka A.P., la nube de agua salada fue empujada hacia el límite oriental de la zona de estudio. Esto se debe a que la infiltración es mayor en el borde oeste que en

los piedemonte norte y este. Cuando empezó a fluir nuevamente el agua en el Desaguadero, las direcciones de los flujos cambiaron notablemente y empujaron en la orilla derecha la nube salada hacia el sur. Esto explica el incremento de concentración después de 2 ka A.P. de las mallas D y S (Figura 3.4b).

Se efectuaron controles de la influencia de los parámetros (porosidad, espesor y concentración inicial) sobre los resultados de las simulaciones en intervalos verosímiles. En todos los casos los resultados calculados comparados a las observaciones muestran concentraciones en el acuífero demasiado bajas y cantidades de cloruro acumuladas en la zona no saturada demasiado fuertes. Por lo tanto, es posible que haya habido lluvias intensas durante el período de subida de 50 m del nivel de agua en el lago Titicaca, alrededor de 2 ka A.P. Esas lluvias probablemente permitieron la lixiviación de la sal acumulada en la zona no saturada y el retorno del cloruro desde el suelo hacia el agua subterránea. Tomando en cuenta este fenómeno en la simulación, los cálculos arrojan al actual 100 M toneladas en el agua subterránea y 150 M toneladas en el suelo no saturado. En 11 000 años, sólo la mitad del cloruro inicialmente presente se habría ido de la zona de estudio hacia otra más abajo.

Los resultados de la modelización de la edad de las aguas subterráneas muestran que en la nube de agua salada el agua tiene una edad promedio de varios miles de años. Las mallas S y D tienen una edad promedio de 6 400 años y de 3 300 años y contienen cerca de un 20% de agua infiltrada hace más de 10 000 años (Figura 3.4c).

Conclusión

El funcionamiento propuesto para explicar la evolución espacial de la concentración de cloruro en el acuífero del Altiplano aclara el mecanismo general de reciclaje de un elemento soluble en una cuenca endorreica. En fase lacustre, la totalidad de la superficie cubierta por el lago está sujeta a la percolación (difusión y convección) de soluciones saladas de la superficie hacia el medio subterráneo. Durante la desecación del lago, las sales que se quedaron en el agua de superficie se concentran alrededor del punto bajo de la cuenca.

En fase árida, las infiltraciones hacia el medio subterráneo presentan concentraciones de bajas a medianas, limitándose a las zonas de piedemonte y de escorrentías permanentes. Muy progresivamente, la convección subterránea rechaza el agua salada hacia el punto bajo. En cuencas de varias decenas de kilómetros este fenómeno puede durar varios miles de años. Cerca

del punto bajo los flujos, tanto superficiales como subterráneos, continúan alimentando esta zona con sales disueltas que se evaporan y se acumulan en forma de costra. Además, en la cuenca en su conjunto donde la capa de agua subterránea no es muy profunda, es decir, a menos de veinte metros bajo el nivel del suelo, el flujo ascendente evaporatorio acumula sales provenientes del acuífero en la zona no saturada. Si ocurren períodos cortos de fuerte pluviometría, aunque insuficientes como para formar un lago, ocasionan una lixiviación y el retorno de las sales del suelo hacia el medio subterráneo. Así, resulta importante considerar la evaporación de los acuíferos en medio árido, no sólo para comprender la dinámica del agua sino también la de las sales.

3.2.2. Localización, caracterización y extracción de los acuíferos en Villaroel (A. Coudrain & R. Ledezma)

Localización

La geomorfología de la provincia G. Villaroel es una primera llave para entender la circulación del agua y la localización de los acuíferos.

- La llanura de inundación Sur desempeña el papel de transmisor del importante flujo subterráneo que desciende de la Serranía de Huayllamarca. Los riachuelos que bajan de esta cordillera han tenido una energía cinética suficiente para penetrar con material aluvial grueso hasta el mismo río Desaguadero. En esta zona, las poblaciones se han asentado preferentemente a lo largo de los principales paleocauces: Chojña hasta San Miguel y Villa Manquiri hasta Puerto Capitán Castrillo. En esta llanura de inundación Sur, los acuíferos colgados son de mucho mayor salinidad que los acuíferos situados por debajo del nivel freático regional y corresponden a la clase química clorurada sódica. Los acuíferos de paleocauces tienen agua potable de clase carbonatada mixta y mixta cálcica (ex. San Miguel). Los suelos situados en la llanura aluvial inundable pertenecen a las series Unupata, Huarajpampa, Caya Churu y los de la llanura aluvial no inundable a las series Laimini, Tholar, Manquiri.

- El piedemonte de Villarroel, constituido por Villa Manquiri (subzona norte), Chojña (subzona central) y Papel Pampa (subzona sur), es una zona de baja conductividad y alta permeabilidad donde se estima que 37 millones de metros cúbicos de aguas subterráneas se transmiten anualmente por el piedemonte Villarroel hacia la llanura de inundación sur y el río Desaguadero. El flujo subterráneo, por atravesar los sedimentos de las formaciones Totorá y Umala, se ha cargado en sulfatos, carbonatos y calcio, con un contenido de sodio que va incrementándose hacia el Sur (Papel Pampa). Este último se encuentra en la clase química de sulfatada cálcica, con una calidad del agua para riego clasificada como C2S1.

Caracterización

El altiplano es una zona endorreica donde todo el agua se evapora debido a una ETP alta y una alta capacidad de retención de los suelos. No hay infiltración superficial ni profunda que permita llevar la sal hasta el acuífero, no hay drenaje y la sal se queda en los primeros metros de suelo. Las sales que se quedan en la zona no saturada no provienen de la infiltración sino de la evaporación. En Villarroel, 6 mm por año se evaporan del acuífero, situado a 6 metros de profundidad. El análisis de cloruro e isótopos O18 en la zona saturada demuestra que hay evaporación pero no hay infiltración. La sal se queda entonces en la zona no saturada (18 kg cloruro/m²) en los 6 metros de profundidad. Esta acumulación corresponde a 13 metros de evaporación del acuífero sin lixiviación hasta el acuífero. La presencia de cloruro isótopos a más de 2 metros, en el nivel de arcilla, indica la última inundación del río Desaguadero en 1984. Con la inundación por el río Desaguadero en 1984, la sal ha lixiviado hasta el nivel de arcilla pero no hasta el acuífero, entonces se ha quedado en el suelo. En el caso de los piedemontes de Huañamarca, el agua de los ríos cargada en sulfato de calcio ha dejado yacimientos de yeso (Tihuacalle Sancari) y sales disueltas.

La escorrentía se concentró en los ríos, provocando erosión en la formación Umala impermeable, pero sin infiltración. Las sales disueltas en el terciario de Umala se acumulan en la zona de inundación de los ríos y se infiltra en las arenas de los lechos de los ríos. El agua de la cordillera se infiltra en el piedemonte y no pasa al otro acuífero de la llanura; éste queda dulce hasta 60 m de profundidad. La calidad de las aguas subterráneas depende también de la profundidad y del funcionamiento de los acuíferos.

La profundidad del acuífero ha sido estimada a partir de 150 pozos con 40 m de profundidad como promedio (18 a 60 m). Con una ETP de 1500 mm/año, se calcula una evaporación del acuífero de 6 a 20 mm. Cuanto más profundo se encuentra el acuífero, entre 2 y 6 metros, se evapora menos. Existen acuíferos colgantes con mayor concentración de sales en arcillas del cuaternario lacustre. Otros acuíferos son confinados a 100m de profundidad; no interfieren con la salinidad del suelo. En la parte Oeste de la provincia, la salinidad es baja (0.3 mS cm^{-1}), por ser una zona de escurrimiento. En la parte este, la salinidad es más fuerte de 2 a 6 mS cm^{-1} . Aguas arriba de esta zona, la salinidad corresponde a la recarga del desaguadero (2 mS cm^{-1}). La mayor salinidad de aguas abajo debe corresponder a la antigua recarga por paleo lagos. La fuerte salinidad de las aguas fósiles de la zona Sud-este del acuífero de Villarroel debe ser relacionada con la sucesión de fases climáticas desde que el río Tauca cubría toda la zona.

Extracción

Riding (1994) construyó en base a los datos de Younger (1992, 1993) un modelo matemático del sistema acuífero de la provincia Villarroel, que permite estimar los volúmenes de aguas subterráneas que se pueden evacuar del acuífero. Se localizaron regímenes de bombeo en dos áreas principales del dominio modelizado, en la zona baja de la provincia (Figura 3.5):

- 1 Area I (Khari, formación Umala). Extracción de $10\,000 \text{ m}^3/\text{día}$ en 20 pozos, todos al menos espaciados de 2 km. Por lo tanto, para propósitos de modelaje, cada pozo debería tener un régimen de bombeo de $500 \text{ m}^3/\text{día}^{-1}$ ($5.8 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ con 24 horas de bombeo por día).
- 2 Area II (depósitos fluviales y coluvioaluviales del Oeste y Sur de la falla de Pupusani) y Area III (depósitos eólicos), ambas del Cuaternario. Extracciones de $25\,000 \text{ m}^3/\text{día}^{-1}$ en cada zona, en un total de 32 pozos, todos espaciados de por lo menos 2 km. Para propósitos de modelaje, se usaron 20 pozos donde cada pozo tendría un régimen de bombeo de $1700 \text{ m}^3/\text{día}^{-1}$ ($19.7 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ con 24 horas de bombeo por día).

Según el modelo matemático, se puede evacuar del acuífero los volúmenes siguientes de agua subterránea: $116 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ en el área I, $289 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ en el área II y $289 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ en el área III. El modelo obtenido tiene una razonable congruencia con las piezometrías medidas en el campo. La única discrepancia se encuentra en el norte de la región donde la información piezométrica fue solamente aportada por tres pozos para un área de unos 150 km^2 . La mayoría de los potenciales

modelizados se encuentran dentro del rango de un metro de variación con respecto a las medidas en el campo.

La mayor parte de la recarga se encuentra en las áreas centrales y sudoeste del dominio, con la lineación geológica de Pupusani marcando el límite entre zonas de alta y baja recarga. El flujo regional se establece desde el noroeste hacia el sudoeste del dominio con la lineación geológica de Pupusani marcando la división entre altos flujos en el Oeste y bajos flujos en el Este. Consecuentemente, hay un flujo regional limitado dentro del sector Este del dominio el cual se pone de manifiesto por la falta de transporte de las aguas contaminadas desde la región de alta salinidad en comparación con la región de baja salinidad hacia el Oeste.

En base a los resultados obtenidos en las anteriores simulaciones, se han formulado recomendaciones para la distribución de pozos dentro del área II. Una reducción o cese de los bombeos dentro de un rango de 5 a 10 km del río Desaguadero podría tener un efecto sensible. Por lo tanto se llevó a cabo una simulación basada en esta hipótesis.

Se distribuyeron 20 pozos a través de las regiones centrales y sur de las áreas II y III, más densamente que en simulaciones anteriores. Se contempló todavía un espacio mínimo de 2 km entre pozos y los regímenes de bombeo indicados en las recomendaciones iniciales. La simulación se llevó a cabo usando los mismos parámetros de transporte que en el Area II. No hubo invasión de las concentraciones de cloruros hacia los pozos reubicados durante el periodo de 50 años; las concentraciones de cloruros fueron convertidas a índices de absorción de sodio. Se muestra una región con agua que fluye dentro del rango de bajo a medio riesgo de sodificación (S1 a S2) cerca del río Desaguadero, pero la salinidad no se extiende hasta la región de bombeo.

Una segunda simulación se llevó a cabo para un período de 100 años obteniéndose similares resultados excepto por una invasión de un SAR 0.5 en 97 años. Este valor es insignificante en comparación con las concentraciones existentes.

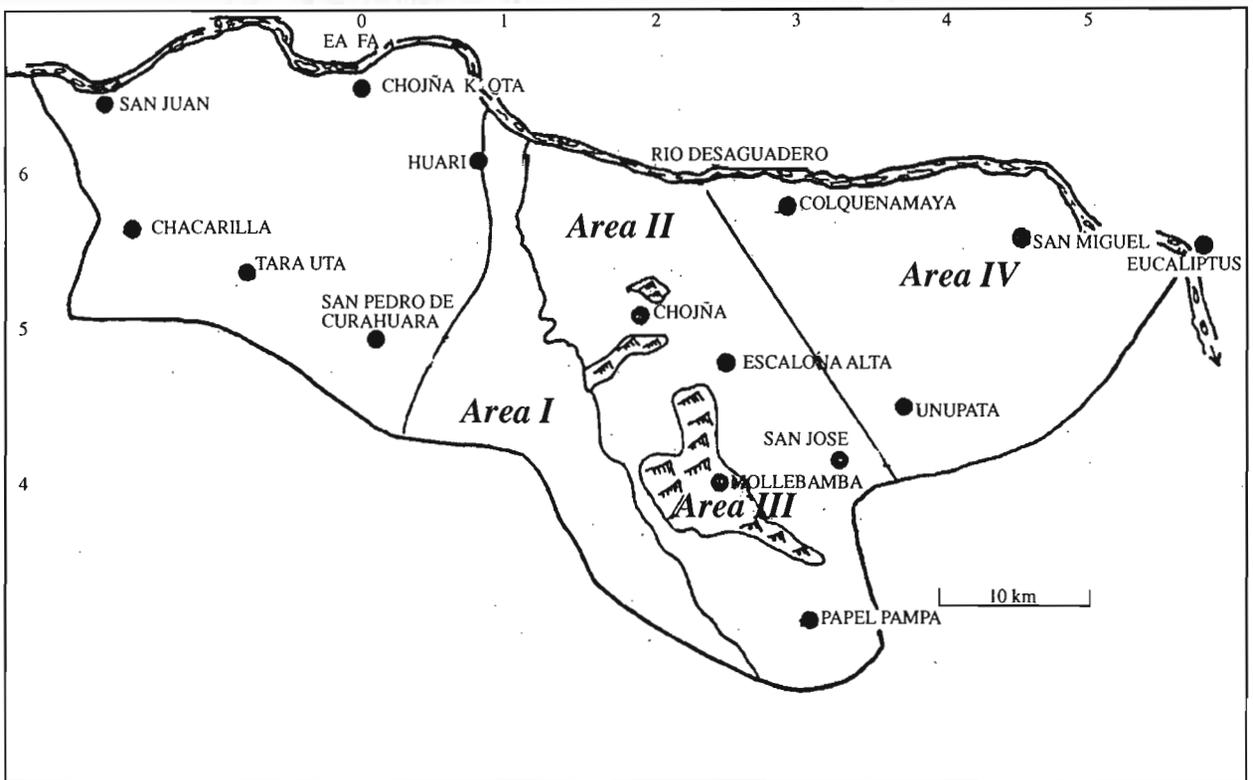
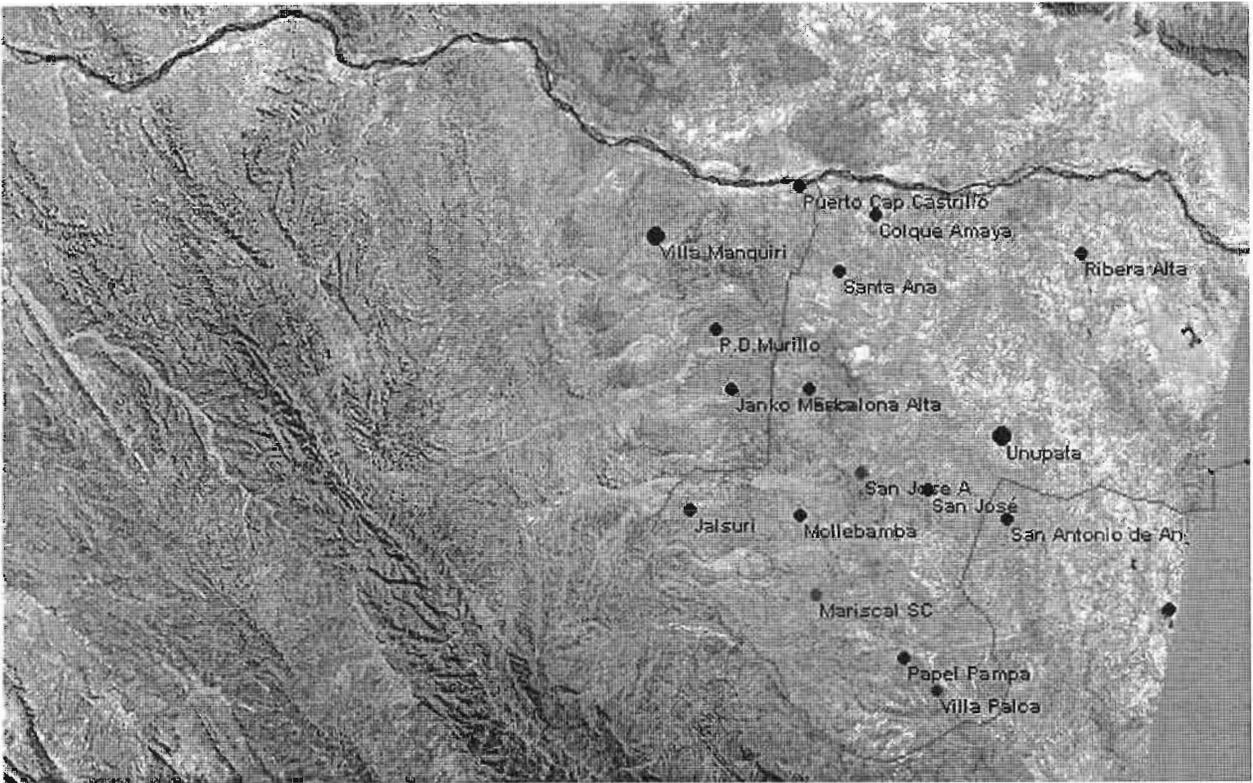


Figura 3.5. Zonificación de zonas hidrostratigráficas en la provincia G. Villarroel (Riding, 1994)

Calidad del agua

Los tipos de aguas subterráneas predominantes, tal como lo demuestran los pozos perforados por Yunta (Cuadro 3.1), son cálcicas-magnésicas-sódicas sulfatadas y/o cloruradas; cálcicas y/o magnésicas cloruradas y/o sulfatadas sódicas. La mayoría de los pozos de la provincia Aroma estuvieron dentro las categorías de salinidad media con peligro de adsorción de sodio bajo (C2S1) y salinidad alta con bajo peligro de adsorción de sodio (C3S1). Sin embargo se nota un incremento de la concentración de sales disueltas en las aguas hacia el sur de la Provincia. llegando a niveles de salinidad alta y peligro de adsorción de sodio alto o muy alto (C3S3 a C4S4). La calidad del agua de los pozos perforados presenta una gran variabilidad en cuanto a su aptitud al riego, incluso mensual (Tabla 1). Pese a estas limitaciones, es una alternativa al uso de aguas superficiales de peor calidad.

Cuadro 3.1. CLASIFICACION PARA RIEGO DE LAS AGUAS DE POZOS PERFORADOS

PTO. DE MUESTREO	CLASIFICACION USDA		SALINIDA EFFECT. (SE)	SALINID. POTEN. (SP)	CARBONATO SODIO RESIDUAL (CSR)	CLORUROS (CI)	BORO (B)	FAO																			
								SALINIZA.	INFILTRA.	TOXICIDAD																	
										Na	Cl	B															
Octubre 93																											
JANK'O HUICHI	C4	S3	NR	NR	B	NR		S	N	S	S	S															
SAN JOSE CENTRO	C2	S1	B	C	B	C	C	L	N-L	N	N	N															
MCAL. SANTA CRUZ	C2	S1	C	C	B	C	C	N	M	N	N	M															
CIRKA CRUZANI	C4	S3-S4	NR	NR	B	NR	NR	S	N	S	S	S															
SAN MIGUEL	C4	S4	NR	NR	B	NR	NR	S	N	S	S	S															
UNION UNUPATA	C4	S2	NR	NR	B	NR	NR	S	N	M	S	S															
UNUPATA	C4	S3	NR	NR	B	NR	NR	S	N	M	S	S															
MOLLEBAMBA	C2	S1	B	B	B	B	C	N	L	N	N	M															
SAN JOSE MICRORIEGO	C3	S1	C	C	B	NR	C	M	N	N	N	M															
ESCALONA ALTA	C3	S1	C	C	B	C	C	M	N	L	N	M															
Noviembre 93																											
SAN JOSE CENTRO	C2	S1	B	B	B	C	C	L	N-L	N	N	S															
SAN MIGUEL	C4	S3	NR	NR	B	NR	NR	S	N	S	S	S															
JANK'O HUICHO	C4	S3	NR	NR	B	NR	NR	S	N	S	S	S															
CIRKA CRUZANI	C4	S3	NR	NR	B	NR	NR	S	N	S	S	S															
MCAL. SANTA CRUZ	C2	S1	B	B	B	B	NR	N	M	N	N	S															
Diciembre 93																											
SAN MIGUEL	C4	S1	NR	?	B	?	NR	S	N	N		S															
JANK'O HUICHI	C4	S1	NR	?	B	?	NR	S	N	N		S															
CIRKA CRUZANI	C4	S1	B	?	B	?	C	S	N	N		S															
SAN JOSE CENTRO	C2	S1	C	?	B	?	C	N	L-M	N		S															
MCAL. SANTA CRUZ	C3	S2	NR	?	B	?	C	N	M	N		S															
Enero 94																											
MCAL. SANTA CRUZ	C4	S1	B	B	B	B	C	N	M	N	N	N															
RIVERA BAJA (SAN MIGUEL)	C3	S2	NR	NR	B	NR	C	S	N	S	S	M															
CIRKA CRUZANI	C4	S4	NR	NR	B	NR	NR	S	N	S	S	S															
JANK'O HUICHO	C4	S3	NR	NR	B	NR	C	S	N	S	S	N															
SAN JOSE CENTRO	C3	S2	NR	NR	B	C	B	N	L	N	N	N															
Febrero 94																											
CIRKA CRUZANI	C2	S2	NR	NR	B	NR	C	N	S	S	S	N															
JANK'O HUICHI	C2	S2	NR	NR	B	NR	C	N	S	S	S	N															
SAN JOSE CENTRO	C2	S1	C	C	B	NR	B	N	M	M	M	N															
MCAL. SANTA CRUZ	C4	S3	C	C	B	NR	C	S	N	S	M	M															
SAN MIGUEL	C2	S1	C	C	B	C	C	N	M-S	M	M	N															
<table border="0" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:25%;">CLASIFICACION MEXICANA</td> <td style="width:25%;">CLASIFICACION SISTEMA FAO</td> <td style="width:25%;">CLASIFICACION DEL USDA</td> <td style="width:25%;"></td> </tr> <tr> <td>B BUENA</td> <td>N NORMAL L LIGERO</td> <td>C1 BAJA SALINIDAD C2 MEDIA SALINIDAD</td> <td>S1 BAJO CONTENIDO DE SODIO S2 MEDIO CONTENIDO DE SODIO</td> </tr> <tr> <td>C CONDICIONADA</td> <td>M MODERADO</td> <td>C3 ALTA SALINIDAD</td> <td>S3 ALTO CONTENIDO DE SODIO</td> </tr> <tr> <td>NR NO RECOMENDABLE</td> <td>S SEVERO</td> <td>C4 MUY ALTA SALINIDAD</td> <td>S4 MUY ALTO CONTENIDO DE SODIO</td> </tr> </table>												CLASIFICACION MEXICANA	CLASIFICACION SISTEMA FAO	CLASIFICACION DEL USDA		B BUENA	N NORMAL L LIGERO	C1 BAJA SALINIDAD C2 MEDIA SALINIDAD	S1 BAJO CONTENIDO DE SODIO S2 MEDIO CONTENIDO DE SODIO	C CONDICIONADA	M MODERADO	C3 ALTA SALINIDAD	S3 ALTO CONTENIDO DE SODIO	NR NO RECOMENDABLE	S SEVERO	C4 MUY ALTA SALINIDAD	S4 MUY ALTO CONTENIDO DE SODIO
CLASIFICACION MEXICANA	CLASIFICACION SISTEMA FAO	CLASIFICACION DEL USDA																									
B BUENA	N NORMAL L LIGERO	C1 BAJA SALINIDAD C2 MEDIA SALINIDAD	S1 BAJO CONTENIDO DE SODIO S2 MEDIO CONTENIDO DE SODIO																								
C CONDICIONADA	M MODERADO	C3 ALTA SALINIDAD	S3 ALTO CONTENIDO DE SODIO																								
NR NO RECOMENDABLE	S SEVERO	C4 MUY ALTA SALINIDAD	S4 MUY ALTO CONTENIDO DE SODIO																								

Fuente : Provincia Gualberto Villarroel (Ledezma, 1995)

3.2.3. Relación entre hidrogeología y salinidad de los suelos en la provincia Aroma

(M. Flores, D. Hervé, V. Mita)

Introducción

La provincia Aroma forma parte de la cuenca endorreica del Altiplano Central boliviano. Se encuentra bordeada, al noreste por la Cordillera Oriental y al oeste la Cordillera Occidental formada por estartovolcanes. Presenta depósitos del cuaternario, rocas terciarias, devónicas y silúricas. El cuaternario se caracteriza por depósitos de origen coluvial, aluvial y fluvio-lacustres, conformados por sedimentos finos y poco permeables; el terciario por la predominancia de rocas de composición granodioritas y el devónico y silúrico por la presencia de areniscas, lutitas y limolitas.

Al Sur de Aroma, se hallaron dos sectores de drenaje de las sales acumuladas: el río Desaguadero en el Suroeste de Aroma y el río Kheto en el Sureste. La presencia de series salinas en la cabeza de la cuenca, asociada a zonas de inundación río abajo, aumenta fuertemente la salinidad de las aguas subterráneas en la parte Sur-Este de la cuenca. Sin embargo, en las series del Cuaternario, más arriba de las zonas de inundación, en la región de Patacamaya donde pasa el río Kheto (Guyot & Gumiel, 1990), parecen existir recursos hídricos de buena calidad.

El clima es semiárido a árido con invierno seco y frío. La precipitación media anual varía entre 300 y 600 mm y es excedida por la ETP. La temperatura media anual es de 9 °C. Estas condiciones de clima son muy adversas para la producción agrícola, que se ve aún más afectada cuando existen problemas de salinidad (agua y/o suelo).

El objetivo del presente trabajo es determinar los factores que influyen en la salinidad de los suelos en la Provincia Aroma a partir de un inventario de pozos de agua subterránea y superficial, y de datos geológicos.

Pozos y fuentes de agua evaluados

Para el presente estudio se realizaron trabajos de campo con personal de la Cooperación Francesa (IRD, ex ORSTOM) y de la Universidad Mayor de San Andrés (La Paz) entre los meses de septiembre de 1990 y marzo de 1991. Fueron inventariados 141 puntos con datos de

conductividad eléctrica entre los cuales 79 pozos de agua para uso doméstico, 13 pozos de agua para microriego y 49 fuentes de agua superficial. Se tomaron 33 muestras de agua para análisis químico en el laboratorio del Instituto de Ecología de la UMSA. Con los datos disponibles se efectuó la clasificación de aguas según el diagrama de U.S. Salinity Laboratory Staff (1954). En gabinete se elaboró un mapa de CE (Figura 3.6), que fue sobrepuesto al mapa geológico de la Provincia Aroma (Figura 3.7), con el objetivo de establecer si existe una relación entre la conductividad del agua y las formaciones geológicas. Adicionalmente se revisó datos existentes sobre suelos que podrían tener problemas de salinidad y/o sodicidad en la zona.

Relación de la salinidad con el Cuaternario

Un análisis espacial del mapa de CE muestra que en dirección Norte-Sur el primer punto donde se aprecia valores altos de CE (1.9 dS.m^{-1}) es en el río Kheto en la localidad de Viscachani. Este punto está dentro de material cuaternario aluvial. La concentración de sodio varía entre 29 y 42.81 mg.l^{-1} según la época, el calcio entre 33.50 y 39.50 mg.l^{-1} . El SAR aj.¹ es de 1.86. Estas aguas son utilizadas para riego y su clasificación (C3S1) muestra un alto riesgo de salinidad y bajo de sodicidad. Los suelos presentan un drenaje lento y se reporta la existencia de suelos salinos y salino-sódicos.

Hacia el Sur, se tiene las comunidades de Churrillanga y San José de Llanga, donde las aguas subterráneas inventariadas presentan una CE cercana a los 2.0 dS.m^{-1} . Los puntos se localizan sobre depósitos fluvio lacustres y terrazas aluviales. Las concentraciones de sodio varían entre 35.20 y 45.22 mg.l^{-1} según la época. El calcio está entre 74.40 y 88.00 mg.l^{-1} . El SAR aj. es de 1.99. Se trata de aguas con alto riesgo de salinidad y bajo en sodicidad (C3S1). En San José de Llanga los suelos son poco desarrollados con perfil AC y ABwkC, unos son salinos y otros salino-sódicos. La napa freática está entre 1.40 y 2.30 m de profundidad (Flores, 1994).

¹ El SAR aj. es el índice SAR ajustado desarrollado por Rhoades (1972): $\text{SAR aj.} = \text{SAR} [1 + (8.4 - \text{pHc})]$
 $\text{pHc} = (\text{pk}'_2 - \text{pk}'_c) + \text{p}(\text{Ca} + \text{Mg}) + \text{p}(\text{AlK})$; $(\text{pk}'_2 - \text{pk}'_c)$ se expresa en función de la suma de las concentraciones de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , expresadas en meq/l; $\text{p}(\text{Ca} + \text{Mg})$ se obtiene en tablas en función de la suma de concentraciones de Ca^{++} et Mg^{++} y $\text{p}(\text{AlK})$ en función de la suma de concentraciones de CO_3^{--} y CO_3H^- , expresadas en meq/l. Se interpreta el valor del SAR ajustado, teniendo en cuenta la conductividad eléctrica expresada a 25°C en micromhos/cm.

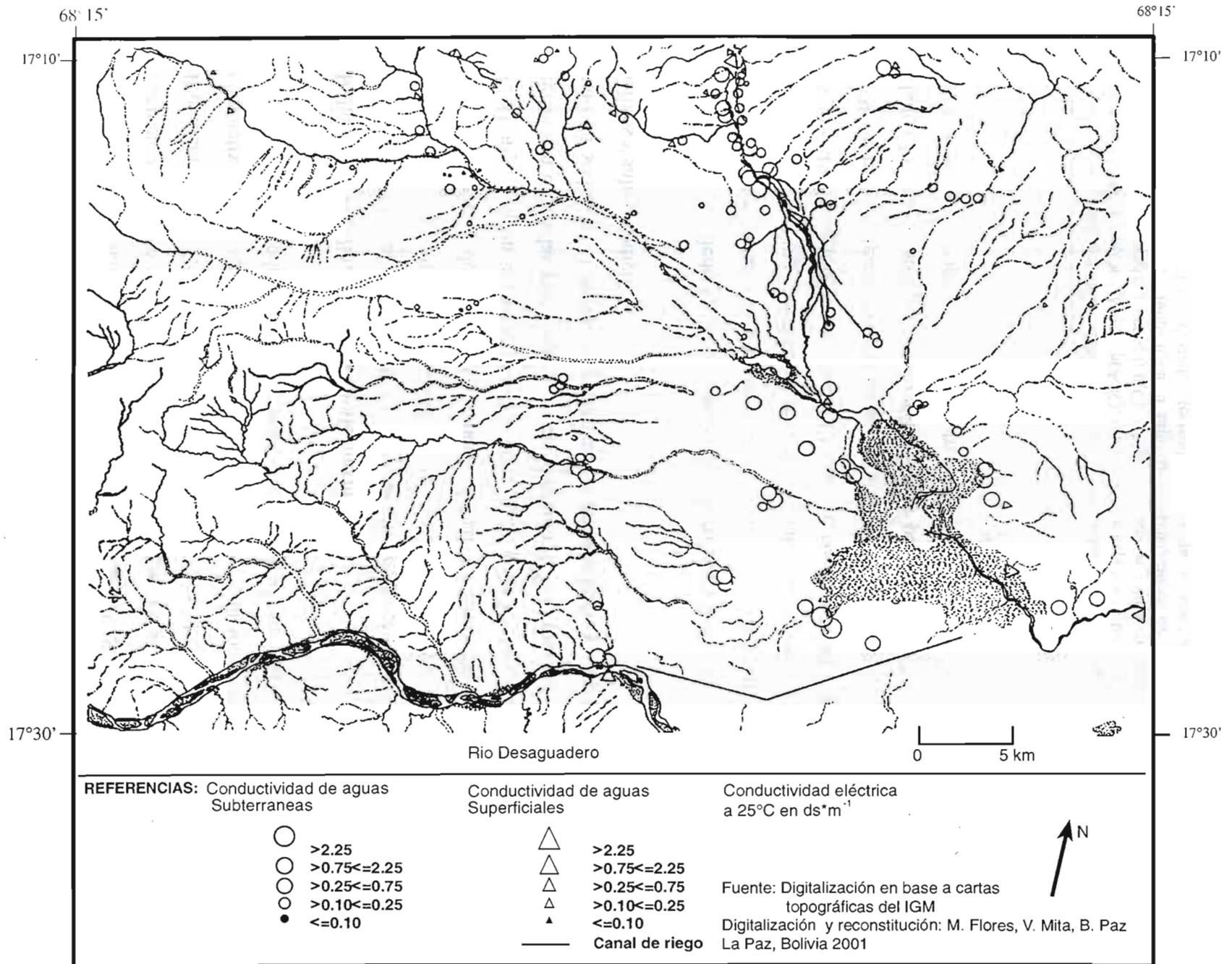


Figura 3.6. Mapa de conductividad eléctrica provincia Aroma (Flores, Mita & Paz, 2001)



REFERENCIAS: 1: Silúrico
 2: Devónico
 3: Terciario
 3a: Terciario Topohoco
 3b: Terciario Umala
 4: Cuaternario
 4a: Cuaternario aluvial
 4b: Cuaternario coluvio aluvial
 4c: Cuaternario coluvio fluvial
 4d: Cuaternario lacustre
 4e: Cuaternario fluvio lacustre
 4f: Cuaternario Terrazas

Fuente: Digitalización en base a mapa geológico de D. Gumiel
 Digitalización y reconstitución: M Flores, V. Mita, B. Paz
 La Paz, Bolivia, 2001



Figura 3.7. Mapa geológico, provincia Aroma (Flores, Mita & Paz, 2001)

Muy cerca del río Desaguadero, en la comunidad de Huari Belen, las aguas subterráneas presentan una CE que varía entre 0.78 y 1.1 dS.m⁻¹ en material coluvio aluvial. El sodio varía según la época entre 26.61 y 28.80 mg.l⁻¹. El calcio entre 85.80 y 88.80 mg.l⁻¹. El SAR es de 1.44. Son aguas con peligro medio a alto de salinidad y bajo de sodicidad (C2,C3-S1). Los suelos son moderadamente bien drenados y de carácter salino y salino-sódico.

El río Desaguadero constituye una fuente de riego para muchas comunidades. En el punto próximo a la comunidad de Chilahuala, la conductividad eléctrica del río es de 2.2 dS.m⁻¹, representando un riesgo alto a muy alto de salinidad.

El principal canal de riego del río en tres puntos de su extensión de Oeste a Este presenta una CE que varía entre 1.9 y 2.0 dS.m⁻¹ y un SAR entre 5.47 y 6.70 (trayecto entre el río Desaguadero y la comunidad de Thola Huancaroma). Estadísticamente existe un efecto significativo de la utilización de estas aguas de riego sobre el aumento de la CE, Na⁺ y Ca⁺⁺ intercambiable, SAR y ESP cuando se compara parcelas irrigadas y no irrigadas con cultivo de alfalfa (Flores, 1994).

El punto con mayor CE se encuentra en el extremo sur-este de la provincia, en las aguas del río Kheto. La CE medida fue de 8.2 dS.m⁻¹. El sodio es de 1073 mg.l⁻¹. El calcio 74 mg.l⁻¹ y el SAR aj. es de 11.03. Son aguas con muy alto peligro de salinidad y alto peligro de sodicidad.

Un análisis de frecuencia muestra que de 50 puntos de muestreo que presentan CE ≥ 0.75 dS.m⁻¹, 38 puntos (76%) están situados sobre formaciones del cuaternario.

En la parte Este de la provincia Aroma, donde predominan las rocas del Terciario, Devónico y Silúrico (con algo de Cuaternario), la CE varía entre 0.12 y 0.65 dS.m⁻¹. El sodio entre 12.98 y 22.91 mg.l⁻¹. El SAR es de 1.02. Son aguas del tipo C1S1 con bajo peligro de salinidad y sodicidad, aptas inclusive para consumo humano. Al momento del inventario las aguas de esta zona eran tanto de uso doméstico como de riego. Los reportes consultados indican que los suelos son moderadamente a bien drenados con presencia de sodio en algunos de los perfiles analizados.

La parte Oeste, donde prevalecen las rocas terciarias (formación Topohoco y Umala) con algo de cuaternario, presenta aguas subterráneas con $CE \leq 0.75 \text{ dS.m}^{-1}$. A lo largo de la formación Topohoco se midieron conductividades inclusive menores a 0.1 dS.m como refleja la CE en pozos de la comunidad del mismo nombre. El drenaje de los suelos varía de bien a imperfectamente drenados. La salinidad también es variable, ya que existen perfiles no salinos, salino y salino-sódicos.

En el contacto de las formaciones Topohoco y Umala la CE es menor a 0.25 dS.m^{-1} . Llegando a la comunidad de Umala en el límite entre el conglomerado Terciario, Cuaternario terraza y Cuaternario aluvial, la CE aumenta considerablemente. Las aguas subterráneas presentan conductividades entre 0.73 y 2.3 dS.m^{-1} . El sodio varía entre 57.42 y 122 mg.l^{-1} . El calcio entre 93 y 222 mg.l^{-1} . El SAR aj. entre 2.87 y 4.35 . Son aguas de calidad C2S1 y C4S2 es decir, con peligro medio a muy alto de salinidad y bajo a medio de sodicidad.

Conclusión

Los pozos de aguas subterráneas inventariados en depósitos del cuaternario son los que presentan en su mayoría porcentual problemas de salinidad ($CE > 0.75 \text{ dS.m}$). Algunos de estos pozos presentan $CE > 2.25 \text{ dS.m}$, lo que muestra que son aguas no aptas para el consumo humano ni para la agricultura. Los perfiles consultados indican una mayor presencia de suelos salinos y/o salino sódicos en este tipo de sedimentos.

Se puede apreciar un cierto incremento del gradiente de salinidad en sentido Norte-Sur sobre el Cuaternario. Así mismo se observa una mayor frecuencia de puntos con CE entre 0.75 y 2.25 dS.m tanto en aguas subterráneas como superficiales en la parte Sur con relación a la parte Norte de la provincia. Los ríos Desaguadero y parte del río Kheto presentan en su parte Sur aguas que no son aptas para el consumo humano ni para el riego.

La salinidad a nivel de suelo se ve acentuada por el déficit hídrico de la zona ($P < ETP$), el drenaje lento de algunos suelos, y la proximidad de la napa freática que en muchos casos es de carácter salino. Las formaciones del Terciario, Devónico y Silúrico presentan aguas de mejor calidad

aptas para el consumo humano y el riego, especialmente en la formación Topohoco de conglomerados. Por otro lado, existe una menor presencia de suelos salinos y/o sódicos.

3.2.4. Aguas superficiales y subterráneas en San José de Llanga (Peña y Coudrain, 1995)

Peña y Coudrain (1995) lograron cuantificar la contribución y calidad respectiva de los recursos superficiales y subterráneos en el caso del canton de San José de Llanga perteneciente a la provincia Aroma. La precipitación media anual de San José Llanga es de 402 mm anuales, 79% en los meses de noviembre a marzo.

El aforo Río Khora Jauría tiene una cuenca de recepción de 64 km² y un lecho constituido de depósitos aluviales. Su restricción para riego es su elevado contenido de material en suspensión (14,545.7 mg/l en enero y 2,1181.2 mg.l⁻¹ en marzo), pero sin restricción para abreviar el ganado. El caudal mantiene una relación polinomial con la precipitación diaria.

Un canal de riego desde el Desaguadero ha sido construido en 1984 por los habitantes de 4 comunidades, sobre 23 km desde la boca toma en K'ala Umaña hasta la última comunidad que lo utiliza, Huarichullpa. El volumen total que ingresa es 274 l.s⁻¹ y el volumen al final del canal es 162 l.s⁻¹. El tramo de mayor pérdida esta comprendido entre la curva de Umamuyta y P'iti (1.95 km) que corresponde a suelos de textura predominante arenosa, donde se pierde 12.8% (23l/s) del caudal inicial. La eficiencia de conducción es de 65.7% hasta la zona irrigada de San José de Llanga (Choconimaya). El nivel freático de la zona irrigada es mínimo el mes de julio, antes de la apertura del canal de riego, y máximo en septiembre debido a la recarga mediante el canal de riego.

En cuanto a la calidad de agua, el mes más crítico es el mes de noviembre, al final de la época seca, por su contenido elevado en sodio y cloruros: no es recomendable para el riego de suelos que tienen su nivel freático cercano a la superficie (1.6m). El agua superficial es de peor calidad que la que viene por el canal de riego.

Se zonifica a la comunidad según la profundidad del nivel de saturación:

Nivel de saturación a menos de 1 metro de profundidad, problemas de drenaje, 226 ha (5%)

Entre 1 y 1.5 m, 12358 ha, 18%

Entre 1.5 y 2 m, 1132 ha, 16%

Entre 2 y 3 m, 1811 ha, 25%

Más de 3m, 2956 ha, 41% cantón (hasta 3.5 m en Anumarca).

El análisis físico-químico de agua de pozos se realizó en noviembre 92 (descarga) y abril 93 (recarga), después de vaciar totalmente los pozos 24 horas antes.

Las zonas de recarga más importantes que tienen menor conductividad eléctrica son aledañas al río Khora Jahuira, luego la de Wilki y por último la de Choconimaya. Las zonas con mayor conductividad son las de Wila Jahuira Pampa hasta con 30 mS.cm^{-1} y una zona intermedia en Choconimaya, en el margen izquierdo del río Khora. La profundidad del nivel freático y piezométrico varía de acuerdo a la hidrología superficial, desde 0.6 m hasta 2.6 m en época de descarga (octubre y noviembre) y de 0.3 a 2.5 m en época de recarga (marzo y abril).

Se recomendaría recolectar agua de lluvia en enero-marzo, mediante estanques; usar el mayor caudal de Khora Jahuira en enero, luego que se sedimente el agua del río; revestir el canal para evitar pérdida por infiltración y contaminación de los acuíferos freáticos.

3.3.Calidad del agua con fines de riego (V. Orsag)

3.3.1. Contenido en sales

La mayoría de los estudios realizados muestra la gran variabilidad estacional del caudal del río Desaguadero. Además el río Desaguadero arrastra gran cantidad de sedimentos, que se van acumulando en la parte media y baja de la cuenca, impidiendo el curso normal del agua y tapando las tomas de varios canales de riego. Esta situación aumenta el déficit de agua de riego frente a las crecientes demandas durante la época seca del año. La calidad de las aguas está estrechamente relacionada con la variación de los caudales debido a los procesos de dilución y concentración. Los estudios realizados en el río Desaguadero por la ELC Milano (1976) muestran

que los mayores caudales ocurren en la época lluviosa del año (Enero). En esta época, los contenidos de sales totales son menores (860 mg/litro), mientras que en el mes de Noviembre, cuando los caudales todavía son bajos para el mismo sitio, las sales se encuentran en niveles mucho más altos (1160 mg/litro). Quintanilla (1994) encuentra en Octubre 1992 una mayor concentración de la mayoría de los elementos en relación al mes de enero 1993 (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Calidad del agua del Desaguadero en dos épocas del año (Quintanilla, 1994)

Características	Unidad	1	2
PH		8,5	8,2
CE	DSm ⁻¹	2,6	1,3
SS	Mg/l	1702	510
Ca	Meq/l	4,6	3,1
Mg	Meq/l	2,33	0,92
Na	Meq/l	16,4	4,6
Bicarbonatos	Meq/l	1,51	1,22
Carbonatos	Meq/l	051	0,00
Cloruros	Meq/l	17,5	4,4
Sulfatos	Meq/l	3,9	3,5
B	Mg/l	3,9	0,4
RAS*	Meq/l	9,21	2,9

1 = Muestra de octubre 1992, 2 = Muestra de enero 1993

En base a estos resultados podemos indicar que para el inicio del riego, se dispone en la zonas de Chilahuala (Santa Ana) y El Choro (Chilahuala) de las aguas de peor calidad (clase C3S2, según la clasificación EUA 1953), mientras que en la época húmeda del año las aguas más diluidas pertenecen a la clase C2S1. Recientemente el ALT volvió a analizar aguas del Desaguadero en tres sitios y dos fechas húmeda (4/12/98) y seca (10/09/99) del año (cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Análisis físico-químico de las aguas del río Desaguadero en tres sitios

(1: Pte Japones ; 2: Pte. Soledad; 3: Pte Carasilla; ver Figura 2.1) y dos fechas (4/12/98, 10/9/99)

Calidad agua	Sitios	4/12/98	10/09/99
PH	1	-	8,55
	2	8,5	8,69
	3	8,5	8,73
C.E (dS m ⁻¹)	1	-	1819
	2	2,7	1862
	3	1,9	1913
S.S (mg/l)	1	-	179,65
	2	425,8	63,02
	3	1092,5	69,96
S.D (mg/l)	1	-	1123,4
	2	1598,2	1155,8
	3	1143,9	1185,4
S.T(mg/l)	1	-	1303,05
	2	2024,0	1218,82
	3	2236,4	1255,36
Na (mg/l)	1	-	328,00
	2	372,00	335,00
	3	298,00	333,0
K (mg/l)	2	20,0	-
	3	19,5	-
Ca (mg/l)	1	-	72,8
	2	86,5	76,5
	3	81,50	92,2
Mg (mg/l)	1	-	19,8
	2	16,4	19,9
	3	6,30	21,2

	3	375,3	521,0
S04 (mg/l)	1	-	69,84
	2	120,24	82,54
	3	131,90	85,72
C03 (mg/l)	1	-	18,0
	2	21,0	24,0
	3	99,0	27,0
HC03 (mg/l)	1	-	146,40
	2	115,9	152,50
	3	123,83	152,50
Dureza Total	1	-	231,00
	2	256,9	240,00
	3	219,2	283,00
SAR	1	-	49,7
	2	9,6	48,3
	3	8,54	44,3

De acuerdo a los resultados del cuadro 3.3, aparece que no todos los cationes van aumentando paulatinamente hacia el sur, tal como propusieron varios autores quienes analizaron el agua en sólo un sector de toda la cuenca. Sólo los sólidos totales, sólidos disueltos, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos van aumentando paulatinamente, mientras que las concentraciones de sodio, magnesio, potasio, cloruros disminuyen hacia el sur (Pte. Carasilla).

En el mes de diciembre, estas aguas pertenecen a las clases C3 (salinidad media a elevada) y C4 (aguas con salinidad elevada), y por lo tanto su uso es sólo recomendado en suelos de permeabilidad moderada a buena, situación que no se presenta normalmente en la mayoría de los suelos de la zona. Cuando se utilizan para riego esta clase de aguas, es necesario considerar la realización de lavados regulares para controlar la salinidad del suelo y se recomienda especialmente utilizarlos en cultivos con tolerancias a la salinidad de media a buena.

Cuadro 3.4. Variación físico química del agua en los canales de riego principales (1) y secundarios (2) de Santa Ana y Japo, en dos fechas

Calidad de Agua	Canal	Santa Ana (Chilahuala)		Japo (El Choro)	
		16/10/98	4/11/98	16/10/98	4/11/98
PH	1	8,4	8,9	8,9	8,4
	2	8,4	8,25	8,6	8,2
C.E (dS m ⁻¹)	1	2,0	1,8	2,5	1,4
	2	2,1	1,9	2,8	2,7
S.S (mg/l)	1	94,5	693,2	220,0	1418,8
	2	32,4	425,8	34,7	1118,8
S.D (mg/l)	1	1195,4	1137	1415,5	827,8
	2	1318,6	1195	1785,5	1251,3
S.T (mg/l)	1	1290	1830,2	1635,5	2246,6
	2	1351	1620,8	1820,1	2370,0
Na (mg/l)	1	382,0	290,0	482,4	192,0
	2	374,6	270,0	487,5	315,0
K (mg/l)	1	17,6	22,7	26,4	17,5
	2	17,9	17,8	32,6	20,6
Ca (mg/l)	1	44,9	55,8	65,5	61,0
	2	54,0	75,0	76,9	87,5
Mg (mg/l)	1	17,1	12,3	14,5	4,6
	2	12,8	12,5	16,0	6,5
Cl (mg/l)	1	492,0	384,9	584,0	264,1
	2	489,0	388,2	630,0	386,6
S04 (mg/l)	1	143,3	160,9	195,3	105,5
	2	117,2	164,4	192,7	149,5
C03 (mg/l)	1	24,0	24,0	36,0	45,0
	2	30,0	24,0	30,0	96,0
HC03 (mg/l)	1	143,4	134,2	201,3	106,8

	2	152,5	136,6	213,5	149,5
Dureza total	1	154,7	169,9	199,8	163,8
	2	166,8	218,5	232,0	235,8

De acuerdo a los resultados del cuadro 3.4, se puede notar que la calidad de las aguas en los canales del sistema de riego de Santa Ana (Chilahuala) y Japo (El Choro) varía a lo largo de éstos, es decir desde la toma (canal principal) hasta los canales secundarios, aumentando en algunos casos el contenido de algunos iones y disminuyendo en otros. Las mayores variaciones en la calidad de las aguas, aunque no en forma significativa, se nota en el Choro (Japo) posiblemente debido a la longitud que tienen sus canales de riego en comparación con los de Santa Ana y debido a que las aguas de riego atraviesan diferentes tipos de suelo que inciden de alguna manera sobre la calidad de las aguas.

3.3.2. Concentración de metales pesados

El contenido de las aguas del río Desaguadero en metales pesados ha sido evaluado tomando en cuenta el uso de estas aguas para riego en las zonas de Chilahuala y El Choro. Las concentraciones totales en el agua de riego de la mayoría de los metales pesados son muy bajas y las cantidades aportadas reducidas por ser el riego complementario. Sin embargo, debido a la acumulación paulatina que pueden tener estos metales en los suelos, es necesario tomar ciertas precauciones a futuro para no sobrepasar los niveles críticos.

Comparando en el cuadro 3.5 dos fechas de muestreo (X y XII, 98), para dos puntos sobre el río (Pte Japones y Pte. Carasilla), se puede evidenciar que no existen en la mayoría de los metales cambios importantes de concentraciones. Sólo en el caso del boro, arsénico y hierro se nota en la época húmeda (diciembre) del año cierta dilución en relación al mes de octubre, mientras que el Cu aumenta.

En una misma fecha, la concentración de algunos metales no sufre diferencias entre dos puntos diferentes (Pte. Japonés y Pte Carasilla) (cuadro 3.5). En el mes de octubre se nota que sólo los contenidos de As, Fe y P disminuyen a medida que avanzamos hacia el Sur , mientras que en el

mes de diciembre sucede lo contrario (P y Fe), sólo el As sufre una disminución. A diferencia de los elementos anteriormente señalados, el boro sufre en el mes de octubre una disminución a medida que se avanza hacia El Choro, mientras que en el mes de diciembre aumenta.

Evaluando la concentración de metales pesados en las aguas de riego de Santa Ana (Chilahuala, cuadro 3.6) y El Choro (Japo, cuadro 3.7), podemos ver que en el mes de octubre 1998, tanto en el canal principal como secundario, los contenidos de metales como : Zn, Cd, Pb, Ag, Co, Cr, Ni, Sb, Mn y Hg, se encuentran por debajo de los límites propuestos por la FAO (Concentraciones Máximas Recomendadas en Aguas de Riego, 1972) y la Reglamentación de la Ley del Medio Ambiente de Bolivia (anexo A): Estándares de Calidad de Aguas para Cuerpos de Agua Ecológicos (1995). Estos resultados referidos al cobalto y el mercurio difieren de los resultados presentados en los estudios Básicos del Sistema TDPS del Plan Director Binacional, donde estos elementos se encuentran por encima de los límites permisibles.

De acuerdo al cuadro 3.8, el arsénico es el único elemento que se presenta por encima de los límites permisibles de ambas referencias (5 a 6 veces más que el límite propuesto por la FAO) y para todas las clases en el caso de la reglamentación boliviana. Conociendo su papel negativo sobre la salud humana es importante estudiar con mayor detalle no sólo su incidencia sobre la salud humana sino también su dinámica en los suelos y la vegetación.

Como no se tienen varias mediciones periódicas para los mismos puntos durante algunos años en forma sistemática, por el momento no se tienen tendencias claras del comportamiento de los metales. En ese sentido desde el punto de vista del riego y su posible impacto sobre los suelos y vegetación sería necesario continuar con este tipo de mediciones para conocer el peligro real que significan estas aguas para la agricultura así como también su efecto sobre los animales y el hombre.

Cuadro 3.5. Concentración de metales pesados en las aguas del Río Desaguadero en dos sitios y dos épocas del año

Parámetro	Sitio de muestreo	Fecha 1 16.X.98		Fecha 2 04.XII.99	
		Canal principal	Canal secundario	Canal Principal	Canal Secundario
Manganeso	1	-0.010	-0.010	-0.010	-0.010
	2	-0.010	-0.010	-0.010	-0.010
Zinc	1	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005
	2	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005
Boro	1	1.275	1.357	1.029	1.132
	2	1.547	1.786	0.957	0.708
Cadmio	1	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005
	2	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005
Cobre	1	0.007	0.006	0.011	0.009
	2	-0.006	0.008	0.013	0.012
Fosforo	1	0.104	0.098	0.070	0.181
	2	-0.016	0.207	0.212	0.107
Hierro	1	0.044	0.049	0.012	0.097
	2	0.017	0.045	0.065	0.048
Plomo	1	-0.050	-0.050	0.044	-0.040
	2	-0.050	-0.050	-0.040	-0.040
Plata	1	-0.020	-0.020	-0.020	-0.020
	2	-0.020	-0.020	-0.020	-0.020
Cobalto	1	0.007	-0.007	-0.007	-0.007
	2	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007
Cromo	1	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007
	2	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007
Níquel	1	-0.010	-0.010	-0.010	-0.010
	2	-0.010	-0.010	-0.010	-0.010

Antimonio	1			-0.005	-0.005
	2			-0.005	-0.005
Arsénico	1	0.640	0.540	0.423	0.333
	2	0.536	0.660	0.244	0.254
Mercurio	1	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
	2	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001

Norma: DIN 38406 T221: Puente Japonés (Chilahua); 2: Puente Carasilla (El Choro)

Nota: un valor negativo indica un valor por debajo del límite de detección

Cuadro 3.6. Concentración de metales pesados en aguas de riego y su comparación con límites permisibles, sector Santa Ana (Chilahuala, 1998)

SÍMBOLO	UNIDAD	Canal Principal	Canal Secundario	CMR (1)	CLASES DE AGUA (2)			
					A	B	C	D
Mn	Ppm	-0,010	-0,010	0,2	0,5c	1,0c	1,0c	1,0c
Zn	Ppm	-0,005	-0,005	2	0,2c	0,2c	5,0c	5,0c
B	Ppm	1,275	1,357		1,0c	1,0c	1,0c	1,0c
Cd	Ppm	-0,005	-0,005	0,01	0,005	0,005	0,005	0,005
Cu	Ppm	0,007	0,006	0,2	0,05c	1,0c	1,0c	1,0c
P	Ppm	0,104	0,098					
Fe	Ppm	0,044	0,049	5				
Pb	Ppm	-0,050	-0,050	5	0,05c	0,05c	0,05c	0,1c
Ag	Ppm	-0,020	-0,020		0,05c	0,05c	0,05c	0,05c
Co	Ppm	0,007	-0,007	0,05	0,1c	0,2c	0,2c	0,2c
Cr	Ppm	-0,007	-0,007	0,1	0,05c	1,0c	1,0c	1,0c
Ni	Ppm	-0,010	-0,010	0,2	0,05c	0,05c	0,5c	0,5c
Sb					0,01c	0,01c	0,01c	0,01c
As	Ppm	0,640	0,540	0,1	0,05c	0,05c	0,05c	0,1c
Hg	Ppm	-0,001	-0,001		0,001	0,001	0,001	0,001

- 1- Concentraciones Máximas Recomendadas en agua de riego, FAO (1989): Water Quality for Agriculture (29), Adaptado por la Academia Nacional de Ciencias (1972) y Pratt (1972).
- 2- Reglamentación de la ley del Medio Ambiente de Bolivia, Anexo A (1995). Estándares de calidad de Agua para Cuerpos de Agua Ecológicos:
 - A Aguas naturales de máxima calidad (apta para consumo humano sin tratamiento)
 - B de utilidad general (Requieren tratamiento físico y bacteriológico para consumo).
 - C de utilidad general (Requieren tratamiento físico, químico y bacteriológico para consumo, apta para riego).
 - D Calidad mínima para consumo humano y limitado para riego.

Los metales pesados, traídos en las aguas de riego, se concentran en los suelos. Orsag & Miranda (2000) proponen de aplicar, para evaluar la concentración de metales en el suelo, los parámetros propuestos por Kloque, 1980 (Rango común y máximos tolerables); Rams & Steines, 1994 (Concentraciones totales críticas) y los parámetros de la Unión Europea (Concentración crítica). Para la concentración de metales en la vegetación, se propone aplicar los parámetros propuestos por Chapman & Prat (1973), o sea concentraciones normales de arsénico, molibdeno, cobalto, cobre. No se tiene parámetros de comparación para plomo, cromo, cadmio, plata, níquel, mercurio y otros (cuadro 3.8).

Cuadro 3.7. Concentración de metales pesados en aguas de riego y su comparación con límites permisibles, sector Japu (El Choro, 1998)

Símbolo	Unidad	Canal principal M2	Canal secundario M1	C.M.R (1)	CLASE DE AGUA (2)			
					A	B	C	D
Mn	Ppm	-0,010	-0,010	0,2	0,5c	1,0c	1,0c	1,0c
Zn	Ppm	-0,005	-0,005	2	0,2c	0,2c	5,0c	5,0c
B	Ppm	1,547	1,786		1,0c	1,0c	1,0c	1,0c
Cd	Ppm	-0,005	-0,005	0,01	0,005	0,005	0,005	0,005
Cu	Ppm	-0,006	0,008	0,2	0,05c	1,0c	1,0c	1,0c
P	Ppm	-0,016	0,207					
Fe	Ppm	0,017	0,045	5				
Pb	Ppm	-0,050	-0,050	5	0,05c	0,05c	0,05c	0,1c
Ag	Ppm	-0,020	-0,020		0,05c	0,05c	0,05c	0,05c
Co	Ppm	-0,007	-0,007	0,05	0,1c	0,2c	0,2c	0,2c
Cr	Ppm	-0,007	-0,007	0,1	0,05c	1,0c	1,0c	1,0c
Ni	Ppm	-0,010	-0,010	0,2	0,05c	0,05c	0,5c	0,5c
Sb	Ppm				0,01c	0,01c	0,01c	0,01c
As	Ppm	0,536	0,660	0,1	0,05c	0,05c	0,05c	0,1c
Hg	Ppm	-0,010	-0,010		0,001	0,001	0,001	0,001

1- Concentraciones Máximas Recomendadas en agua de riego, FAO (1989): Water Quality for Agriculture (29), Adaptado por la Academia Nacional de Ciencias (1972) y Pratt (1972)

2- Reglamentación de la ley del Medio Ambiente de Bolivia . Anexo A. (1995). Estándares de calidad de Agua para Cuerpos de Agua Ecológicos

- A Aguas naturales de máxima calidad (apta para consumo humano sin tratamiento)
- B de utilidad general (Requieren tratamiento físico y bacteriológico para consumo.
- C de utilidad general (Requieren tratamiento físico, químico y bacteriológico para consumo, apta para riego.
- D Calidad mínima para consumo humano y limitado para riego.

Cuadro 3.8. Niveles de toxicidad de metales pesados en el suelo

SIMBOLO	UNIDAD	RANGO COMUN 1	MAXIMO TOLERABLE 1	NIVELES CRITICOS 2	CTC 3	CC 4
As	Ppm	2,0-20,0	20,0			
Cd	Ppm	0,1-1,0	3,0		8	1-3
Co	Ppm	1,0-10,0	50,0	60-125		
Cr	Ppm	2,0-50,0	100,0		75	
Cu	ppm	1,0-20,0	100,0		100	50-140
Hg	ppm					1-1,5
Mn	ppm			300		
Mo	ppm	1,0-5,0	5,0			
Ni	ppm	2,0-50,0	50,0		100	30-75
Pb	ppm				200	50-300
Zn	ppm	3,0-50,0	300,0	210-360	400	150-300

Fuentes: Activation Laboratories Ltd. Work Order N° 17530 Report 17492 R

- 1 Kloke (1980)
- 2 Niveles Críticos. Kabata-Pendras, Pendras (1992)
- 3 Concentración Total Crítica - CTC . Rams y Steines (1994)
- 4 Concentración Crítica - Unión Europea

3.3.3. Calidad de agua con fines de riego

Se puede definir la calidad del agua para riego por su contenido en sales, en boro, en metales pesados y en limo o en sedimentos en suspensión.

El laboratorio de salinidad de Riverside (USA) introdujo y propuso la Relación Sodio-Adsorción (SAR o RAS) (Richards y Cols 1954) como un índice práctico para evaluar el riesgo de sodificación o el peligro del sodio en el agua en razón de que determinar el PSI o la Relación de Sodio Intercambiable (ESR) resulta más difícil.

El SAR o RAS se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})/2}}$$

El empleo del SAR se ha generalizado y su uso sigue siendo de interés práctico. No obstante, hay que tener en cuenta que el análisis teórico en que se basa presenta limitaciones (Sposito, 1977):

- La expresión de K_G' (Coeficiente de selectividad de Gapon, modificado) es errónea.
- La ecuación del SAR no toma en cuenta la formación de pares iónicos, lo que puede afectar la relación entre monovalentes y divalentes en la solución del suelo.

Esto llevó a Sposito & Mattigod (1999) a distinguir entre:

$\text{SAR}_p = \text{SAR}$ "práctico"

$\text{SAR}_T = \text{SAR}$ "Verdadero", corregido para los complejos de pares iónicos.

$$\text{SAR}_T = 0,08 + 1,115 \text{ SAR}_p \quad r^2=0,99$$

y en general: $\text{SAR}_T > \text{SAR}_p$

Oster & Sposito (1980) indican que en el intervalo de 0 a 40 para el PSI, la estimación del PSI a partir del SAR_T no difiere grandemente de la realizada con el SAR_p . Por ello, el SAR clásico puede seguir utilizándose como un criterio básico para medir el riesgo de sodicidad.

Otros criterios más recientes que la SAR toman en cuenta la concentración de electrolitos y del boro en el agua. En el agua del suelo el boro se presenta en forma de ácido bórico (H_3BO_3), que es la forma en la que puede ser absorbido por las plantas y, a medida que aumenta el pH hacia 9, la forma predominante es el $\text{B}(\text{OH})_4$, tóxica para diversas especies vegetales. Otros autores miden la conductividad eléctrica (cuadro 3.9, Ayers & Tanji, 1981), o combinada con otra variable (Ayers & Wescott, 1985) para definir clases de restricción del uso del agua (cuadro 3.10). Finalmente, Miyamoto *et al.* (1984) relaciona el contenido en sales expresado en ppm con el nivel de daño a los cultivos (cuadro 3.11).

Cuadro 3.9. Calidad del agua de riego (Ayers & Tanji, 1981)			
SAR %	CE dS m⁻¹ a 25° C		
	Sin Problema	Ligero o Moderado	Grave
0-3	> 0.9	0.9-0.20	< 0.20
3-6	> 1.3	1.3-0.25	< 0.25
6-12	> 2.0	2.0-0.90	< 0.35
12-20	> 3.1	3.1-0.90	< 0.90
> 20	> 5.6	5.6-1.8	< 1.80

Cuadro 3.10. Restricciones de Uso del agua (Ayers & Wescott, 1985)

	Ninguna	Ligera a Moderada	Importante
Riesgo de Salinización			
CEs (dS m⁻¹ a 25 °C)	< 0,7	0,7- 3,0	> 3,0
Riesgo de Sodificación			
SARp CE (dS m⁻¹ a 25 °C)			
0 - 3	> 0,7	0,7 - 0,2	< 0,2
3 - 6	> 1,2	1,2 - 0,3	< 0,3
6 -12	> 1,9	1,9 - 0,5	< 0,5
12 -20	> 2,9	2,9 - 1,3	< 1,3
20 - 40	> 5,0	5,0 - 2,9	< 2,9
Riesgo de Toxicidad Cl (meq l⁻¹)			
Riego de Superficie	<4	4 – 10	> 10
Riego por Aspersión	<3	>3	-
Boro (mg l⁻¹)	< 0,7	0,7 - 3,0	>3,0
Bicarbonato (meq l⁻¹)	< 1,5	1,5 - 8,5	> 8,5

Cuadro 3.11. Calidad del Agua de Riego (Epstein, 1983)

Características	Calidad del Agua de Riego	
	Buena	Marginal
CE (dSm ⁻¹)	0-1	1-3
Sólidos Disueltos (ppm)	0-500	500-1500

Por otro lado, de acuerdo a Ayers & Tanji (1981, cuadro 3.9), estas aguas están catalogadas para el mes de septiembre como aguas de calidad ligera a moderada debido al papel positivo que cumplen sus concentraciones de electrolitos sobre la estructura y la permeabilidad del suelo (Porta et al., 1994). Según Quirk & Schofield (1955), Van Olphen (1977), Golberg & Foster (1999), citados por Porta, se dispone de un indicador de floculación-dispersión, el Valor de Floculación (VF) o la Concentración Crítica de Coagulación (CCC) que se define como la concentración del agua que al entrar en equilibrio con el suelo, para un ESP dado, provoca una disminución de la permeabilidad de un 10 o un 15 %, o también como la concentración mínima de un electrolito necesaria para flocular un coloide disperso en un determinado tiempo (24 h). Cuando la concentración de electrolitos en el agua de riego es menor que la CCC, tendrá lugar la dispersión de los agregados del suelo, provocando una disminución de la porosidad, aereación, agua almacenada y disponible.

Aplicando los niveles de toxicidad a los cloruros de Ayers y Wescott (1985, cuadro 3.10), las aguas del Desaguadero tienen una importante restricción para el riego debido a la incidencia de los cloruros sobre el metabolismo y el potencial osmótico de las plantas a pesar del efecto positivo de los electrolitos sobre la estabilidad de los agregados y por consiguiente sobre la permeabilidad del suelo. Mientras que de acuerdo a su contenido de bicarbonatos estas aguas pertenecen a aguas de calidad ligera a moderada.

Considerando la clasificación de aguas de riego propuesta por Epstein (1983) (cuadro 3.11) sobre la calidad de las aguas de riego, en base a la conductividad y sólidos disueltos, las aguas del Desaguadero para el mes de septiembre son catalogadas como marginales.

Los contenidos de boro en el río Desaguadero en el mes de octubre (Pte Japonés y Pte Carasilla) fluctúan entre 1,27 y 1,54 ppm, valores que de acuerdo a la tabla 3.12, propuesta por Leeden *et al.* (1990), corresponden a aguas buenas a permisibles. Por consiguiente, en la época seca del año no existiría problemas con sus contenidos.

Cuadro 3.12. Contenido de boro en agua de riego (Leeden *et al.*, 1990)

Boro (mg B/l)	Clase de Agua
< 0,67	Excelente
0,67 < B < 1,33	Buena
1,33 < B < 2,0	Permisible
2,0 < B < 2,5	Dudosa
> 2,5	Impropia

Por otro lado, el aporte de limo con las aguas de riego en suelos ya de baja permeabilidad hace la irrigación muy difícil. Rocabado (1999) indica que las aguas del río Desaguadero contienen entre 1,2 a 2 gramos de sólidos totales por litro. Considerando que cada metro cuadrado de suelo cultivado recibe como promedio durante el año entre 110 a 300 l, esta superficie estaría recibiendo anualmente cerca de 132 a 600 gramos de sólidos, lo que en 20 años de riego significa una adición entre 2,64 y 12 kilogramos de material fino por metro cuadrado.

4. SUELOS SALINOS Y/O SÓDICOS

4.1. Principios del origen, formación y clasificación de los suelos salinos y sódicos (V. Orsag, M. Flores)

Introducción

Los suelos denominados suelos salinos, salinos sódicos y sódicos presentan algunas limitaciones para la producción agropecuaria, en razón de que las sales inciden no solo sobre las propiedades del suelo sino, en forma indirecta, sobre el desarrollo de las plantas. En ese sentido es importante conocer los procesos de acumulación de sales en el perfil del suelo y poder clasificar estos suelos según sus limitantes. Se revisaran las referencias a suelos salinos y sódicos en los sistemas de clasificación edafológica internacionales, actualmente en uso en Bolivia: Clasificación Taxonómica, Clasificación de la FAO-UNESCO, y en las clasificaciones de uso de suelos y tierras: clasificación agrológica según la capacidad de uso de la tierra, clasificación de suelos de acuerdo a su aptitud para el riego y Sistema FAO de evaluación de tierras.

Origen y formación de los suelos salinos y/o sódicos

La presencia de sales en el suelo, en primer lugar tiene que ver con los procesos naturales de mineralización o meteorización de las rocas durante la formación de los suelos. Por ejemplo, los esquistos sódicos dan origen al sulfato sódico y la dolomita, la olivina y la hornablenda pueden originar sales magnesianas. En climas húmedos estas sales formadas, generalmente pueden ser lavadas de todo el perfil del suelo, mientras que en climas áridos o semiáridos, generalmente no son removidas de las capas superficiales.

La presencia de sales solubles en zonas secas también se puede deber a la existencia de antiguos depósitos secundarios, donde antes existían lagos. Tal es el caso de los antiguos lagos Michin y Ballivián en el Altiplano boliviano, cuyos sedimentos contienen elevadas cantidades de sales solubles debido al aporte de sales de toda su cuenca y a la concentración paulatina de sales durante la desaparición de estos lagos. Estas sales acumuladas en los sedimentos contribuyen a la concentración de sales en los suelos formados a partir de estos materiales.

En condiciones naturales, existe una relación marcada entre la ocurrencia y presencia de suelos salinos / sódicos con las condiciones climáticas áridas y semiáridas, debido a que en estos climas, la evapotranspiración potencial (ETP) en la mayoría de los meses del año es mayor a la precipitación (P). Bajo estas condiciones, las escasas precipitaciones no permiten el lavado de sales desde las capas superficiales del suelo y los movimientos ascendentes del agua del subsuelo facilitan su acumulación en los horizontes superficiales.

Los valles cerrados, llanuras planas o de depresión, sin drenaje adecuado de descarga como el caso de la llanura fluvio-lacustre del río Desaguadero, son sitios de acumulación paulatina de sales. Estos procesos son favorecidos por el predominio de partículas finas (arcilla o limo) en el subsuelo que no permite un movimiento descendente del agua y por la presencia de napas freáticas superficiales. Así mismo, como estas áreas son muy planas, el escurrimiento superficial es nulo o escaso, y por lo tanto no se produce una evacuación superficial de las sales hacia otros lugares.

A las causas naturales se añade un uso de los recursos cobertura vegetal, suelo y agua, que puede favorecer los procesos de salinización/alcalinización de las tierras de cultivo y pastoreo. En la llanura fluvio lacustre del Desaguadero, el pastoreo excesivo y la extracción de leña exponen los suelos, sin agregados estables debido a su contenido en arcilla y limo, a la erosión hídrica y eólica, y a una mayor tasa de pérdida de agua del suelo por evaporación, contribuyendo a la acumulación de sales y/o sodio en los horizontes superficiales del suelo. Por otra parte el riego, aplicado con deficiencias de drenaje y con aguas cargadas en sales puede favorecer los procesos de salinización/alcalinización.

Magistad (1945) y Lopez (1998) identifican 5 procesos que conducen a la formación de suelos salinos y/o sódicos:

Salinización

Proceso de acumulación de sales por la evaporación del agua del suelo o cuando no se logran drenar adecuadamente las aguas superficiales y subterráneas. En las primeras etapas de salinización predominan las sales de sodio. Los sulfatos y carbonatos de calcio son menos solubles por lo que se acumulan más lentamente.

Sodificación

Proceso por el cual aumenta el contenido de sodio intercambiable gracias al intercambio de sodio de las sales de la solución por otros cationes del complejo absorbente. La sodificación paulatina del suelo no necesariamente produce un incremento del pH.

Alcalinización

Al acumularse las sales en los suelos, se establece un equilibrio inicial entre los iones cargados positivamente en la solución y los absorbidos en los coloides del suelo. Como las sales de sodio se concentran más en la solución del suelo, se absorben mayores cantidades de este catión. Al aumentar el porcentaje de sodio intercambiable y acumularse carbonato de sodio, puede ocurrir una hidrólisis del Na^+ intercambiable o la formación del Na_2CO_3 , lo que produce un incremento del pH hacia valores cerca de 10. Bajo estas condiciones, se produce la dispersión de las arcillas y de la materia orgánica. La movilización de la materia orgánica en solución da lugar a la formación de eflorescencias negras en la superficie del suelo. En las clasificaciones antiguas estos procesos recibían el nombre de Alkali negro.

Desalinización

Este es el proceso por el que se lavan las sales solubles que se han acumulado en los suelos. Generalmente, cuando las sales se han extraído en su mayor parte, los coloides tienden a dispersarse y la permeabilidad del suelo disminuye.

Degradación o Solutización

Si el suelo está sujeto a una desalinización y no contiene yeso o calcio, no existen bases para reemplazar el sodio, después de que se han extraído las sales solubles. En ese sentido el sodio intercambiable tiende a hidrolizarse, para formar hidróxido de sodio y ser reemplazado por iones de hidrógeno. El hidróxido de sodio reacciona fácilmente con el anhídrido carbónico del aire, formando carbonato de sodio. Cuando se produce un lavado intenso de estos suelos, puede haber una eliminación del carbonato de sodio y el hidrógeno del complejo absorbente es reemplazado por el sodio, produciéndose un descenso del pH. Generalmente los suelos alcalinos degradados presentan un pH menor a 6.

Tipos de suelos salinos y/o sódicos

Según los procesos en marcha, los suelos salinos se encuentran entonces en diferentes estados que el Laboratorio de Salinidad de EUA (1953) ha propuesto clasificar en tres categorías: Salinos, Salino-Alcalinos (que preferimos llamar Sódicos-Salinos) y Alcalinos-no Salinos (que preferimos llamar Sódicos-no Salinos), en base a la conductividad eléctrica, el pH y el porcentaje de sodio intercambiable.

Suelos sodicos-salinos¹

Llámense así aquellos suelos cuya conductividad del extracto de saturación es mayor a 4 dS.m^{-1} a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y cuyo porcentaje de sodio intercambiable es mayor a 15. Este tipo de suelos se forma como resultado de los procesos combinados de salinización y acumulación de sodio. Siempre que contengan un exceso de sales, su apariencia y propiedades son similares a las de los suelos salinos. Cuando hay exceso de sales el pH raramente es mayor a 8.5 y los coloides del suelo permanecen floculados. Si el exceso de sales solubles es lavado, las propiedades de estos suelos pueden cambiar notablemente, llegando a ser idénticas a las de los suelos sódicos-no salinos. A medida que la concentración de sales disminuye en la solución, parte del sodio intercambiable se hidroliza para formar hidróxido de sodio que, a su vez, puede cambiarse en carbonato de sodio. En cualquier caso, el lavado de este tipo de suelo dispersa las partículas, facilita la penetración del agua y las labores de labranza pero puede hacerlo mucho más alcalino (pH mayor a 8.5). Aunque el retorno de las sales solubles puede hacer que baje el pH y que las partículas regresen a una condición floculada, el manejo de los suelos sódicos-salinos sigue siendo un problema hasta que se elimine el exceso de sales y de sodio intercambiable de la zona radicular del cultivo y se restablecen las condiciones físicas del suelo.

Cuando se lavan suelos sódicos-salinos que contienen yeso, eliminando simultáneamente el exceso de sales, el calcio se disuelve reemplazando al sodio intercambiable.

Suelos salinos

El término salino se aplica a suelos cuya conductividad eléctrica del extracto de saturación es mayor a 4 dS.m^{-1} a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y cuyo porcentaje de sodio intercambiable es menor a 15; generalmente el pH es menor a 8.5. Estos suelos corresponden al tipo descrito por Hilgard (1906)

¹ Se les conoce también como Suelos salino-alcalinos

como suelos “álcali blanco”, por la presencia de costras blancas de sal en su superficie, y a los “Solonchacks” de los autores rusos. En estos suelos el establecimiento de un drenaje adecuado permite eliminar por lavado las sales solubles.

Las características químicas de los suelos salinos quedan determinadas principalmente por el tipo y cantidad de sales presentes. La cantidad de sales solubles presentes controla la presión osmótica de la solución del suelo. El sodio rara vez representa más de la mitad del total de los cationes solubles y por lo tanto, no es adsorbido en forma importante. Las cantidades relativas de calcio y magnesio, presentes en la solución del suelo y en el complejo de intercambio, varían considerablemente. Tanto el potasio soluble como el intercambiable son, en general, constituyentes de menor importancia. Los aniones principales son el cloruro, el sulfato y a veces el nitrato. Pueden presentarse también pequeñas cantidades de bicarbonato, pero invariablemente los carbonatos solubles casi no se encuentran. A parte de sales rápidamente solubles, los suelos salinos pueden contener sales de baja solubilidad, como el sulfato de calcio (yeso) y carbonatos de calcio y magnesio (caliza).

Los suelos salinos casi siempre se encuentran floculados debido a la presencia de un exceso de sales y a la ausencia de cantidades significantes de sodio intercambiable. En consecuencia, la permeabilidad es igual o mayor a la de suelos similares no salinos.

Suelos sódicos-no salinos²

Son aquellos suelos cuyo porcentaje de sodio intercambiable es mayor a 15 y cuya conductividad del extracto de saturación es menor a $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. El pH generalmente varía entre 8.5 y 10. Estos suelos parecen, en ciertos casos, a los “Solenetz” de los autores rusos. Con mucha frecuencia se encuentran en las regiones áridas y semiáridas en áreas pequeñas e irregulares conocidas como “manchas de álcali impermeables”. Siempre que en los suelos o agua de riego no se encuentre yeso, el drenaje y lavado de los suelos sódicos-salinos conduce a la formación de suelos sódicos no salinos, con un aumento del pH por el mayor hidrólisis del sodio intercambiable. En los suelos altamente sódicos, la materia orgánica dispersa y disuelta puede

² Se les conoce también como Suelos alcalinos no salinos

depositarse en la superficie debido a la evaporación causando así un ennegrecimiento y dando origen al término “álcali negro” (Hilgard, 1906).

Después de largo tiempo, los suelos sódicos no salinos adquieren características morfológicas peculiares. Debido a la gran dispersión de la arcilla parcialmente saturada con sodio, ésta puede ser transportada hacia abajo y acumularse en los niveles inferiores. Como resultado, unos cuantos centímetros de suelo superficial pueden presentar textura relativamente gruesa y quebradiza, aunque más abajo, donde se acumula arcilla, el suelo puede desarrollar una capa densa y de baja permeabilidad, con estructura prismática o columnar, que lo hace difícil de labrar. El sodio intercambiable puede tener una marcada influencia en las propiedades físico-químicas de un suelo sódico no salino. Su aumento en la solución del suelo favorece la dispersión del suelo y tiende a aumentar el pH a veces hasta el valor de 10. Mientras los aniones presentes consisten en su mayor parte de cloruros, sulfatos y bicarbonatos, también pueden presentarse pequeñas cantidades de carbonatos. A pH muy elevado y en presencia de iones carbonato, el calcio y el magnesio se precipitan, de manera que las soluciones del suelo, de suelos sódicos no salinos, usualmente contienen sólo pequeñas cantidades de estos cationes, predominando el sodio. Grandes cantidades de potasio intercambiable y soluble pueden presentarse en algunos de estos suelos; su efecto sobre las propiedades de los suelos no se ha estudiado ampliamente. Ciertos suelos sódicos o salinos contienen un porcentaje de sodio intercambiable mayor a 15 y, sin embargo, el pH, especialmente en la superficie, puede ser tan bajo como 6. A estos suelos De Sigmond (1938) los llama suelos alcalinos degradados. Se presentan en ausencia de caliza y el bajo pH es resultado del hidrógeno intercambiable. Sin embargo, las propiedades físicas están dominadas por el sodio intercambiable y corresponden típicamente a la de un suelo sódico no salino.

Los suelos salinos/ sódicos en los sistemas de clasificación de suelos

En Bolivia, se tendrá que escoger los sistemas de clasificación utilizados a nivel mundial de los suelos salinos/sódicos más adaptados a las situaciones y disponibilidad de datos locales. Eschenbrenner (1982) aplicó la *Soil Taxonomy* para su estudio de los suelos de Challapata en el altiplano boliviano. Los edafólogos bolivianos están divididos entre la *Soil Taxonomy* y la clasificación de la FAO.

Sistema de clasificación de la Soil Taxonomy

El sistema de clasificación de la *Soil Taxonomy*, propuesto por la Soil Survey Staff de EUA (International Society of Soil Science en 1960, 75, 90, 92), considera una síntesis cuantitativa de propiedades, relaciones y características intrínsecas del suelo (Porta et al., 1994). Clasifica suelos y no procesos formadores, por lo que solo requiere conocer las propiedades y características del suelo y no su génesis. Considera propiedades del suelo que por lo general tienen significancia frente a su uso y manejo por el hombre. Define con igual precisión todos los niveles jerárquicos, por lo que puede ser utilizada tanto en estudios a nivel detallado como de generalización.

Esta clasificación establece seis niveles jerárquicos: Orden, Suborden, Grupo, Subgrupo, Familia y Serie. Para definir los diferentes niveles taxonómicos, la *Soil Taxonomy* considera las características de 7 horizontes de diagnóstico superficiales (Epipedones): Móllico, Umbrico, Antrópico, Plaggen, Ochrico, Hístico y Melánico, como de los horizontes inferiores (Endopedones) que se forman debajo del horizonte A. Por el otro lado, toma en cuenta los regímenes de humedad (duración de los estados del “suelo seco” y “suelo húmedo” que solo se puede estimar, en nuestras condiciones, a partir de datos climáticos) y de temperatura del suelo (temperatura media anual del suelo a 50 cm). En el caso de los suelos salinos / sódicos, usa caracteres de diagnóstico complementarios: la presencia de carbonatos cálcicos pulvurentos, minerales meteorizables, etc.

8 de los 19 endopedones, definidos a nivel mundial por la *Soil Taxonomy*, están relacionados con suelos salinos/alcalinos o yesosos:

- Horizonte Cálxico. Horizonte de acumulación de carbonato cálcico o cálcico y magnésico: Bk, Ck, tiene 15 cm de espesor o más y contiene un 15% de CaCO₃ equivalente.
- Horizonte Petrocálxico. Horizonte cálcico cementado: Bkm, km, Ckm.
- Horizonte Hipercálxico. Horizonte de acumulación de carbonato cálcico o cálcico y magnésico, muy generalizado en todo el horizonte (>60 %): K, horizonte recomendado por el Comité de Aridisoles (ICOMID, 1989).
- Horizonte de acumulación de Yeso: Bwy, Ym.
- Horizonte Petrogípsico. Horizonte de yeso cementado: Bym, Ym.

- Horizonte Hipergípsico. Horizonte subsuperficial con yeso muy abundante (>60%): Y; horizonte recomendado por el Comité de Aridisoles (ICOMID, 1989).
- Horizonte Nátrico. Horizonte con iluviación de arcilla sódica, porcentaje de sodio intercambiable o ESP >15%: Btna.
- Horizonte Sáfico. Horizonte de 15 cm o más de espesor con un enriquecimiento secundario de sales más solubles que el yeso en agua fría.

Sistema de clasificación de suelo FAO-UNESCO

Esta clasificación surge como respuesta a una recomendación de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo a la FAO para preparar el Mapa Mundial de Suelos. Se completó este mapa en un periodo de veinte años, implicando en este proyecto a unos trescientos científicos de todo el mundo (FAO-Unesco, 1997). La FAO desarrolló una leyenda internacional tomando como denominador la existencia de esquemas nacionales acomodados a los patrones de mayor cobertura de suelos y resaltando su importancia geográfica (Driessen & Dudal, 1991). La Clasificación de suelos FAO-UNESCO comprende tres categorías: 9 categorías mayores y 28 “Grupos Mayores de Suelos” en el nivel más alto de generalización, 153 “Unidades de Suelos” en el segundo nivel y “Subunidades de Suelos” en un tercer nivel definido para apoyar la realización de mapas de escalas mayores. Su esquema conceptual se acerca al del *Soil Taxonomy* (FAO, 1970), como lo demostró Porta et al. (1994), comparando ambas clasificaciones (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Correspondencia entre las clasificaciones Soil Taxonomy y FAO-UNESCO
Características generales (ventajas y desventajas)

Clasificación Soil Taxonomy	Clasificación FAO – Unesco
- Terminología auto explicativa	- Terminología tradicional
- Uso de horizontes y propiedades diagnóstico	- Uso de horizontes y propiedades diagnóstico
- Uso de regímenes de temperatura y humedad	- Uso de zonas agroecológicas y climáticas a nivel general
- clasificación más cuantitativa	- clasificación menos cuantitativa
- Requiere mayor disponibilidad de recursos económicos	- Requiere menor disponibilidad de recursos económicos
- Requiere mayor conocimiento para su empleo	- Requiere menor conocimiento y menos datos-
- Requiere mayor disponibilidad de datos	Fácilmente adaptable a países en vías de desarrollo
- Mayor dificultad para su adaptación	

Correspondencia jerárquica

Clasificación Soil Taxonomy	Clasificación FAO-UNESCO
- Orden	- Grupo Mayor de Suelos
- Sub-orden	- Grupo Mayor de Suelos
- Gran Grupo	- Unidad de suelos
- Sub Grupo	
- Familia	
- Serie	

Correspondencia entre denominaciones

Clasificación FAO-UNESCO	Clasificación Soil Taxonomy
Leptosoles líticos	Rendolls
Vertisoles	Vertisols
Fluvisoles salicos	Fluvents
Fluvisoles calcáricos	Fluvents
Solonchaks	Salic (Gran grupo)
Gleysoles	Aquic (parte de subordenes)
Arenosoles	Psaments (parte)
Regosoles	Orthents, Psaments (parte)
Solonetz	Natric (Gran grupo)
Chernozems lúvicos	Argiborolls (parte)
Chernozems cálcico	Calciborolls (parte)
Chernozems haplicos	Haploborolls, vermiborolls
Kastanozems luvicos	Argiustolls, aridic agiborolls
Kastanozems cálcicos	Calciustolls, aridic calciborolls
Kastanozems haplicos	Haplustolls, aridic haploborolls
Phaeozems calcáricos	Vermudolls (parte)
Gypsisoles	-
Calcisoles	-
Luvisoles cálcicos	Haplustalfs (parte)
Cambisoles cálcicos	Eutrochrepts, ustochrepts, xerochrepts (parte)

Según Booker (1991).

Las principales diferencias radican en la terminología utilizada para denominar los suelos y en la utilización (Soil Taxonomy) o no (FAO-UNESCO) de las condiciones climáticas, como criterio de clasificación. Los mapas elaborados por la FAO-UNESCO prescinden de los regímenes de

humedad y temperatura de la Soil Taxonomy, en razón de que es difícil disponer de esta información, en países como Bolivia, por ejemplo. La metodología de la FAO resulta más aplicable en el campo que la clasificación americana, ya que las unidades taxonómicas están definidas con menor precisión y se requerían menos datos analíticos de laboratorio.

Los horizontes diagnóstico empleados en la clasificación de suelos salinos y/o sódicos son los mismos en ambas clasificaciones con excepción de los horizontes hipercálcico, hipergypsico y sálico. En la clasificación FAO-UNESCO, las propiedades diagnóstico consideradas para suelos salinos y/o sódicos son 6:

- Calcáreo: Se refiere a materiales edáficos que presentan fuerte efervescencia con HCl al 10% en la mayor parte de la tierra fina o que contiene más del 2% de carbonato cálcico equivalente.
- Calcárico: Se refiere a suelos que son calcáreos en una profundidad entre 20 y 50 cm.
- Caliza pulverulenta blanda: Se refiere a la caliza autigénica translocada, lo suficientemente blanda como para poder rayarla con la uña, que ha sido precipitada "in situ".
- Gypsífero: Se refiere a materiales edáficos que contienen un 5% de yeso como mínimo.
- Propiedades sálicas: Se refiere a una conductividad eléctrica del extracto saturado mayor a 15 dS m⁻¹ en una profundidad de 30 cm a partir de la superficie si el pH es mayor a 8.5.
- Propiedades sódicas: Se refiere a una saturación en el complejo de cambio del 15%, como mínimo de sodio o del 50% o más de sodio más magnesio en el complejo de intercambio.

Las fases son factores limitantes relativos a rasgos superficiales o subsuperficiales del terreno, que no tienen que estar necesariamente relacionadas con la formación del suelo y que generalmente sobrepasan los límites de las unidades de suelos diferentes. Estos rasgos pueden constituir un obstáculo para el uso del terreno. Las fases relacionadas con la salinidad y/o sodicidad son llamadas fase sálica y sódica.

La fase sálica indica suelos que en algún horizonte, dentro de una profundidad de 100 cm a partir de la superficie, muestran valores de la conductividad eléctrica del extracto saturado, mayores a 4 dS m⁻¹ a 25°C. La fase sálica no se indica para los Solonchaks, puesto que su definición implica ya un elevado contenido en sales. Aunque la fase sálica indica una salinización actual o potencial, se ha comprobado que las consecuencias de la salinidad varían mucho con el tipo de sales presentes, la permeabilidad del suelo, las condiciones climáticas y las especies cultivadas.

La fase sódica indica suelos que tienen más del 6% de saturación de sodio en el complejo de intercambio en algún horizonte dentro de una profundidad de 100 cm a partir de la superficie. La fase sódica no se indica para las unidades de suelos que tienen horizonte B nátrico o que tienen propiedades sódicas puesto que su definición implica ya un alto porcentaje de saturación en sodio.

Clasificaciones de uso del suelo

La *Clasificación Agrológica según la Capacidad de Uso de la Tierra* fue el sistema de clasificación elaborado por el Servicio de Conservación de Suelos en EUA (USDA) entre los años 40 y 50. Basada específicamente en Clases Agrícolas, Subclases y Unidades de Capacidad Agrológica, esta clasificación establece o estima la capacidad del terreno para su empleo bajo usos agrícolas, sin descender a unos sistemas o prácticas de cultivo específicos.

Las clases agrícolas agrupan 8 clases de unidades de suelo (enumeradas con números romanos) según sus características de productividad actuales y las limitaciones del clima y de las propiedades del suelo. De esta manera, los suelos de una misma clase presentan supuestamente características más o menos similares para producir tipos similares de cultivo, requieren de un manejo similar o semejante y por otro lado requieren de prácticas de conservación parecidas y tienen un potencial productivo similar.

Las Subclases se definen por las limitaciones que presenta una clase determinada de suelos para la producción de cultivos a nivel intensivo. La limitación se añade en forma de subíndice a la clase de suelo. Las limitaciones definidas son: riesgo de erosión (e), exceso de agua (w), limitaciones de suelo a nivel radicular (s), limitaciones climáticas (c). La pedregosidad y la salinidad no están señaladas específicamente con un subíndice.

Las Unidades de Capacidad Agrológica son unidades cartográficas de mayor homogeneidad que presentan las mismas potencialidades, limitaciones o respuesta al manejo. La información básica requerida para definir o determinar la capacidad agrológica de un suelo considera los siguientes criterios que pueden variar de acuerdo a las condiciones locales: profundidad efectiva, textura del horizonte superficial, conductividad hidráulica, clase de drenaje, capacidad de retención de agua disponible, pendiente, riesgo de erosión, riesgo de inundación, salinidad, alcalinidad, sustancias tóxicas, riesgo de heladas, índices climáticos. Las características de salinidad aparecen solamente a este nivel.

La clasificación de suelos de acuerdo a su Aptitud para el Riego fue desarrollada por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos de América (USBR, 1953), donde la aptitud de la tierra para el riego se define por la posibilidad de soportar una agricultura de riego sostenible, caracterizada por una capacidad productiva potencial y factores económicos (costos de producción y de transformación). La capacidad productiva de una zona depende de aspectos como clima, suelo, calidad y cantidad de agua de riego y drenaje del sistema, aspectos relacionados estrechamente con la salinización o alcalinización de los suelos. Para determinar las “clases” de aptitud, se toman en cuenta la salinidad (dSm^{-1} a $25^{\circ}C$) y la sodicidad (PSI) del suelo.

El sistema FAO de evaluación de tierras, basado en el “Esquema para la Evaluación de Tierras FAO, 1976”, se adapta a circunstancias locales y es de fácil comprensión (Flores et al, 1999).

La metodología básica en la evaluación de tierras comprende los siguientes pasos:

- interpretación fisiográfica sobre imágenes satélite y definición de los tipos de utilización de la tierra;
- definición de las cualidades de la tierra (CTs) en base a características que se pueden medir (como pendiente, textura del suelo, porcentaje de carbono, fósforo, pedregosidad superficial, conductividad eléctrica del extracto saturado, porcentaje de sodio intercambiable), para definir cualidades de la tierra (como por ejemplo disponibilidad de nutrientes, drenaje en el suelo, profundidad efectiva, posibilidad de uso de implementos, periodo libre de heladas, ausencia de riesgo de erosión, ausencia de salinidad, ausencia

de sodicidad (estas dos últimas cualidades son las consideradas para la evaluación en suelos salinos y/o sódicos));

- definición de los grados de requerimientos de cada tipo de utilización de tierra (TUTs: cultivos anuales, perenes o terrenos de pastoreo extensivos o intensivos, convertidos según tablas de conversión);
- finalmente comparación de las cualidades de la tierra con los grados de requerimiento para llegar a la clase de aptitud.

Los cuadros 4.2 a 4.3 muestran ejemplos de grados de aptitud de suelos salinos y/o sódicos y el cuadro 4 muestra los grados de requerimiento para el tipo de utilización de la tierra en *agricultura anual intensiva de altura (> 3000 msnm)*.

Cuadro 4.2. Grado de aptitud del suelo según salinidad

Grado	Conductividad Eléctrica (dS/m)
1	< 2,0
2	$2,0 \leq C \leq 4,0$
3	$4,0 < C \leq 8,0$
4	$8,0 < C \leq 16,0$
5	> 16,0

Nota: La lectura obtenida (en dilución 1:5 suelo: agua, en dS/m), debe ser multiplicada por el factor 6,4 para aproximarse a la determinación de salinidad en el extracto saturado.

Cuadro 4.3. Grado de aptitud del suelo según sodicidad

Grado	Sodio Intercambiable (%)
1	< 6
2	$6 \leq Na \leq 10$
3	$10 < Na \leq 15$
4	$15 < Na \leq 30$
5	> 30

Cuadro 4.4. Grados de requerimiento para una agricultura anual intensiva de altura (>3000 msnm)

Clase aptitud	Grados de calidad de la tierra									
	Disponibilidad de:			Riesgo Inundación	Erosión hídrica	Uso tractores	Profundidad Efectiva	Grado Salinidad	Grado Sodicidad	Periodo libre de heladas
	nutrientes	agua	oxígeno							
I	2	4	1	2	1	1	1	1	1	5
II	2	5	1	3	1	2	2	1	2	6
III	3	5	2	4	2	3	3	2	3	7
IV	Cualquier grado más abajo que para la clase III									

Se entiende por aptitud, la capacidad de producción de una unidad determinada de tierra para un tipo de utilización definido. La unidad de tierra puede considerarse en su estado natural o después de haber introducido mejoramientos. Se usa cuatro clases de aptitud: II regular; III marginal y IV no apto. Algo muy importante a considerar es que los tipos de utilización de la tierra, las características, las cualidades y los grados de requerimiento pueden variar de acuerdo a las necesidades y sobre todo en función de la escala de trabajo. Un sistema automatizado para la evaluación de tierras ALES, funciona en DOS y ha sido diseñado en base al esquema para evaluación de tierras de la FAO. A partir de las características, cualidades y requerimientos de la tierra se construyen árboles de decisión que permiten llegar a la clase de aptitud para un determinado tipo de utilización.

4.2. Los suelos salinos y/o sódicos en la llanura fluvio lacustre

4.2.1. Origen de la salinidad en la llanura fluvio lacustre (V. Orsag, R. Ledezma, M. Flore.)

Desde la formación de la cordillera de los Andes y la meseta que hoy se conoce como el altiplano (periodo cuaternario de la era Cenozoica), se han sucedido varios lagos grandes, extendidos en la depresión central que, al secarse por evaporación, depositaron sus sales inicialmente formando gigantescas “costras salinas”. Dicha depresión contiene actualmente los salares de las lagunas de esta zona. Los últimos grandes lagos fueron el Lago Minchin (40000 – 25000 A.C.) y el Lago Cauca (11000 – 10000 A.C.) (Coudrain et al., 2000; Risacher & Fritz, 1995).

Para la formación de un suelo salino se requiere primordialmente que la evaporación exceda a la precipitación. Las fuentes directas de sales son las aguas subterráneas, que contienen sales en disolución, con concentraciones que dependen de los materiales geológicos que han estado en contacto con esta agua (Vargas, 1990).

En cambio los suelos sódicos son el resultado de la exposición de suelos anteriores a aguas con altos niveles de sodio y con una alta proporción de carbonato ácido. La velocidad con que se presentan los problemas depende del RAS del agua que entre, de su evaporación, de la precipitación de yeso en esta agua y de la disolución de minerales del suelo (Fassbender & Bornemisza, 1987).

Estos elementos explican por qué los suelos de la llanura fluvio-lacustre son salinos y por qué pueden seguir salinizándose por la evaporación de aguas subterráneas, también salinas. En ese sentido los problemas de salinidad y alcalinidad de la llanura fluvio-lacustre del Altiplano boliviano son persistentes. Esta acumulación de sales o álcalis está afectando las propiedades del suelo y está incidiendo negativamente sobre la cobertura vegetal y por ende sobre la capacidad de carga de las praderas. Por otro lado, esta menor cobertura vegetal incide también sobre la erosión eólica e hídrica de los suelos.

4.2.2. Llanura de inundación Sur, provincia G. Villarroel (S. Jacobsen, H. Bosque)

El ex Departamento de Suelos del Ministerio de Agricultura (MACA, 1976) realizó una primera clasificación de los suelos salinos de la llanura fluvio-lacustre de Villarroel en 1974 (Cuadro 4.5). Los datos del cuadro 1 son muy generales y las determinaciones de los grados de salinidad de los suelos se han hecho en una época determinada del año, sin tomar en cuenta la dinámica que tiene este proceso durante un ciclo anual. Evaluaciones posteriores completaron estos datos. Quisbert (1980) realizó una clasificación y mapeo de suelos según grados de salinidad, Moreau (1989) delimitó, con teledetección áreas salinas y sódicas y Ledezma (1995) estudió la influencia del riego en los procesos de salinización y sodificación en los suelos de Villarroel.

Cuadro 4.5. Características de los suelos de la llanura fluvio lacustre de G. Villarroel

Zonas de la provincia G. Villarroel	CARACTERÍSTICAS				
	Drenaje	pH	CEe (mS cm ⁻¹)	CIC (meq/100g)	PSI (%)
Unupata*	Imperfecto	F. Alcalino	< 4 S; >4 SB	33.1 – 34.2	< 15
Manquiri*	Imperfecto	F. Alcalino	< 4	4.24	< 15
Laimini*	Imperfecto	F. Alcalino	< 4	32.7 - 43.6	< 15
Caya Churu	Imperfecto	F. Alcalino	> 4	33.8 – 46.6	> 15
Pujallito	Imperfecto	F. Alcalino	> 4	17.0 – 32.2	> 15
Tholar*	Imperfecto	Neutro en Sup.	< 4 S; > 4 SB	29.6 – 51.9	<15S; >15SB
Huaray Pampa*	Imperfecto	Neutro en Sup.	< 4 S; >4 SB	5.5 – 9.0	<15S; >15SB
San Miguel	Imperfecto	F. Alcalino	< 4 S; >4 SB	22.7 – 55.9	>15
Santa Ana	Imperfecto	Neutro en Sup.	> 4	51.7 – 54.3	> 15
Papel Pampa	Imperfecto	F. Alcalino	> 4	Alto	> 15
Cañaviri	Mod. Bien	Neutro en Sup.	< 4	12.8 – 21.0	> 15

Legenda:

Fuente: MACA (1976)

* Suelo salino apto para el cultivo

CEe: Conductividad eléctrica en extracto de saturación,

CIC: Capacidad de intercambio catiónico,

PSI: Porcentaje de sodio intercambiable

F.: "Fuertemente", S: Capa superficial del suelo, SB: Subsuelo.

Quisbert (1980) ha estudiado la zona comprendida entre Tomás Barron – Papel Pampa – Chilahuala, que incluye el 77% de la llanura fluvio lacustre de G. Villarroel. Señala que los suelos de esta llanura son derivados de sedimentos lacustres, que conforman la parte norte del antiguo lago Minchin, con pendiente este-oeste de 0 a 6%. Señala que de la superficie total estudiada (990.3 km²), 334.7 km² son suelos normales, 58.6 km² son salinos (S₁ y S₂), y, 483.6 km² son salino-sódicos (SS₁, SS₂ y SS₃) (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Clases de salinidad de suelos salinos y salinos sódicos

Suelos Salinos:		Suelos Salino-Sódicos:	
S1:	CEe = 4 - 8 mS cm ⁻¹ PSI < 15%	SS1:	CEe = 4 - 12 mS cm ⁻¹ PSI = 15 - 20 % pH = 8.5
S2:	CEe = 8 - 12 mS cm ⁻¹ PSI < 15% pH = 8.5	SS2:	CEe = 12 - 20 mS cm ⁻¹ PSI = 20 - 40% pH = 8.5
		SS3:	CEe = 20 - 24 mS cm ⁻¹ PSI = 40 - 60% pH = 8.5

Sobre la base de este trabajo, hicimos una estimación de las superficies salinizadas de la llanura fluvio lacustre mapeada, en sus diferentes grados, habiendo establecido de que existen 281.9 km² normales, 40.2 km² salinos y 403.1 km² salino sódicos (cuadro 4.7).

Cuadro 4.7. Extensión de los suelos afectados por salinidad y sodicidad en la llanura fluvio lacustre

Salinidad		Superficie (km ²)	Porcentaje territorial de la llanura Fluvio Lacustre	Porcentaje territorial de la provincia
Nombre	Símbolo			
Salinos	S1	6.2	0.40	0.32
	S2	34.0	2.19	1.76
Salino sódicos	SS1	63.5	4.08	3.28
	SS2	122.7	7.89	6.34
	SS3	217.2	13.97	11.22

Elaborado por Jacobsen & Bosque (2001), basándose en Quisbert (1980)

Estudios realizados por Quisbert (1985) en los sectores de Chilahuala – Eucaliptus y Papel Pampa,

indican que cerca de 99.03 ha (48,84 %) de sus suelos pertenecen a la clase salino-sódica y solo un 5,92 % son salinos, mientras que el 33,8 % (33.474 ha) son suelos normales. Situaciones similares han sido descritas en la llanura fluvio lacustre del Desaguadero por Orsag *et al* (1994). Señalan para los suelos del sector de la Joya (40.854 ha) que sólo el 8,5 % son suelos aptos para la agricultura y sin problemas de salinidad, mientras que el 63% está afectado por concentraciones de sales o sodio.

En Villarroel, Moreau *et al.* (1997) utilizan la diferencia de reflectancia entre eflorescencias salinas superficiales de suelos sódicos y salinos para mapear estos suelos usando fotos Landsat y Spot al final de la época seca, en lo visible, infrarrojo cercano de los canales 4, 5 y 7 (Figura 4.1). En los suelos salinos, las inflorescencias son blancas (NaCl); en los suelos sódicos, la defloculación de la materia orgánica lleva a inflorescencias más oscuras y el cloruro de magnesio (MgCl₂), más soluble, crea una reflectancia más alta.

4.2.3. Llanura no inundable (provincia Aroma) (D. Hervé)

En la comunidad de San José de Llanga, Miranda (1995) distingue 5 unidades fisiográficas: llanuras fluvio-lacustre, fluvial y aluvial; depósitos eólicos; terraza residual. 52% de la superficie de la comunidad (5853 ha) es afectada por sales y sodio, dentro de los cuales 30% presentan problemas de drenaje y salinidad (Solonchaks) y 22,5% un exceso de salinidad y sodio (Hipersolonchaks). 18% del área (1065 ha) son cubiertos de Fluvisoles bien drenados aptos para el cultivo de alfalfa. El área apta para el cultivo de papa es limitada a 25% de los Luvisoles y Lixisols; son recomendables en estas zonas enmiendas de sulfato de calcio y aporte de abonos orgánicos.

En la comunidad de Huaraco (Salm & Gehler, 1989; Salm, 1984), el Instituto de Ecología estudio la salinidad del suelo en plena época seca (julio 1983) en las comunidades de Antipampa, Villa Esteban Arce, partes de Huaraco, Rumer khota, Machacamarca, Angostura, Cullucullin (Figura 4.3). Toda la parte norte y sur oeste del área de estudio, formada por colinas y pic de monte, presenta suelos sin ninguna salinidad. A esta unidad de mapeo también pertenecen pequeñas colinas en el límite sur y dos "lenguas de tierra" que se introducen de las colinas a la llanura, bordeando los dos ríos principales del área de estudio Belén y Huaraco" ($< 0.5 \text{ g.kg}^{-1}$

suelo). Los suelos de 5 a 30% de pendiente, son superficiales y pedregosos donde predominan arbustos, *Parastrephia lepidophylla* y *Baccharis incarum*. Colindante al piedemonte y ya formada parte de la llanura, empieza una franja de unos 200 a 500 m de ancho, con pendiente inferior a 3%, donde se inicia la salinización del suelo, presentando contenidos bajos entre 0.5 y 2 g.kg⁻¹ de suelo. Los arbustos son reemplazados por gramíneas. *Calamagrostis orbygniana* y *Hordeum muticum*. Esta zona intermedia llamada también piedemonte puede ser fuente de acuíferos subterráneos. Avanzando dentro de la llanura hacia partes de mayor depresión, el contenido de sales aumenta irregularmente en suelos arcillosos de pendiente inferior a 1%. En algunos lugares, se presentan zonas con un contenido medio de sales de 2 a 4 g.kg⁻¹ y a poca distancia, de menos de 2 g.kg⁻¹ hasta más de 8 g.kg⁻¹, este último en las depresiones de las llanuras hacia el Desaguadero que queda a 15 km del extremo sur de la zona en estudio. Predominan *Distichlis humilis* y *Festuca dolichophylla* con sales >2 g.kg⁻¹. A más de 4 g.kg⁻¹, predominan cojines de q'otal (*Anthobryum triandrum*), *Distichlis humilis* y *Festuca dolichophylla*. La *Festuca* desaparece con contenidos de unos 8 g.kg⁻¹. Adicionalmente, aparece *Salicornia pulvinata*. Lorini *et al.* (1984) han medido tensiones de succión hasta 71 bar en halófitas de la pampa de Caracollo. A contenidos mayores a 15-20 g.kg⁻¹, no se encuentran especies vegetales.

Salm & Gehler (1989) han determinado los cationes y aniones en nueve muestras de suelo. A medida que aumenta la salinidad, las proporciones de los cationes, calcio, magnesio, potasio y sodio se desplazan en favor del sodio. En la subcuenca del río Molle Puncu, el sodio llega al 60% del total de los cationes solubles y en la subcuenca de los ríos Huaraco y Totorá, el sodio soluble sobrepasa el 90% de los cationes solubles. El anión más importante es el sulfato, seguido del cloruro, mientras que el bicarbonato se encuentra en cantidades pequeñas. El borato está presente en niveles tóxicos, en varios lugares, el amonio y el nitrato tienen valores bajos (0.1 - 1.7 ppm).

Del estudio de un solo pozo en Huaraco, de marzo 1981 a mayo 1982 y en 83-84, se descarta una salinidad baja del orden de 0.1g/l, con un lento aumento en la época seca y una rápida disminución en los meses más lluviosos. El nivel freático es suficientemente superficial para que se produzca un asenso capilar y evaporación a la superficie del suelo, con depósitos de sal; el lavado del suelo con las primeras lluvias en noviembre y diciembre es la causa por la cual la salinidad del agua subterránea sigue aumentando a principios de la época húmeda.

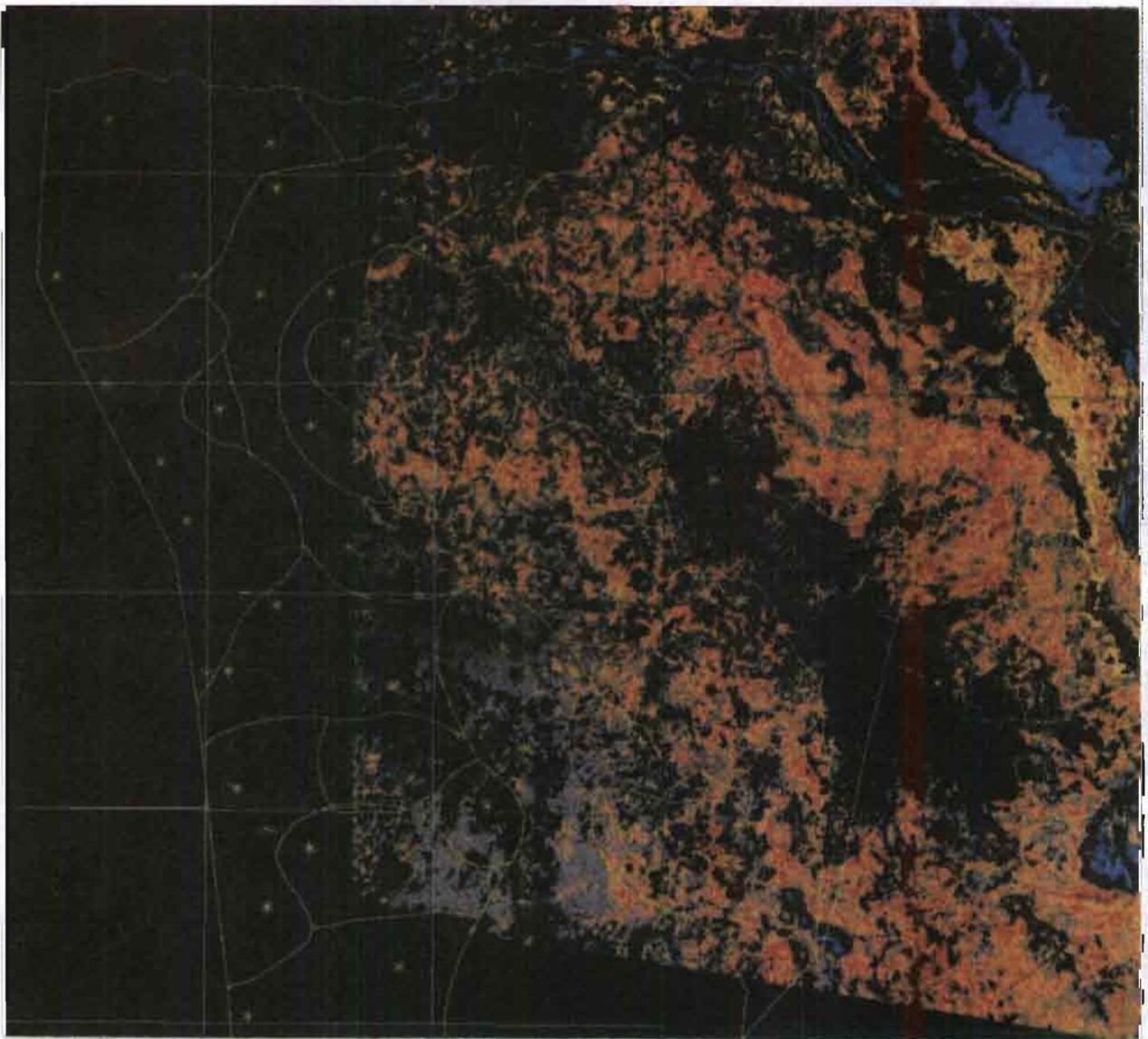
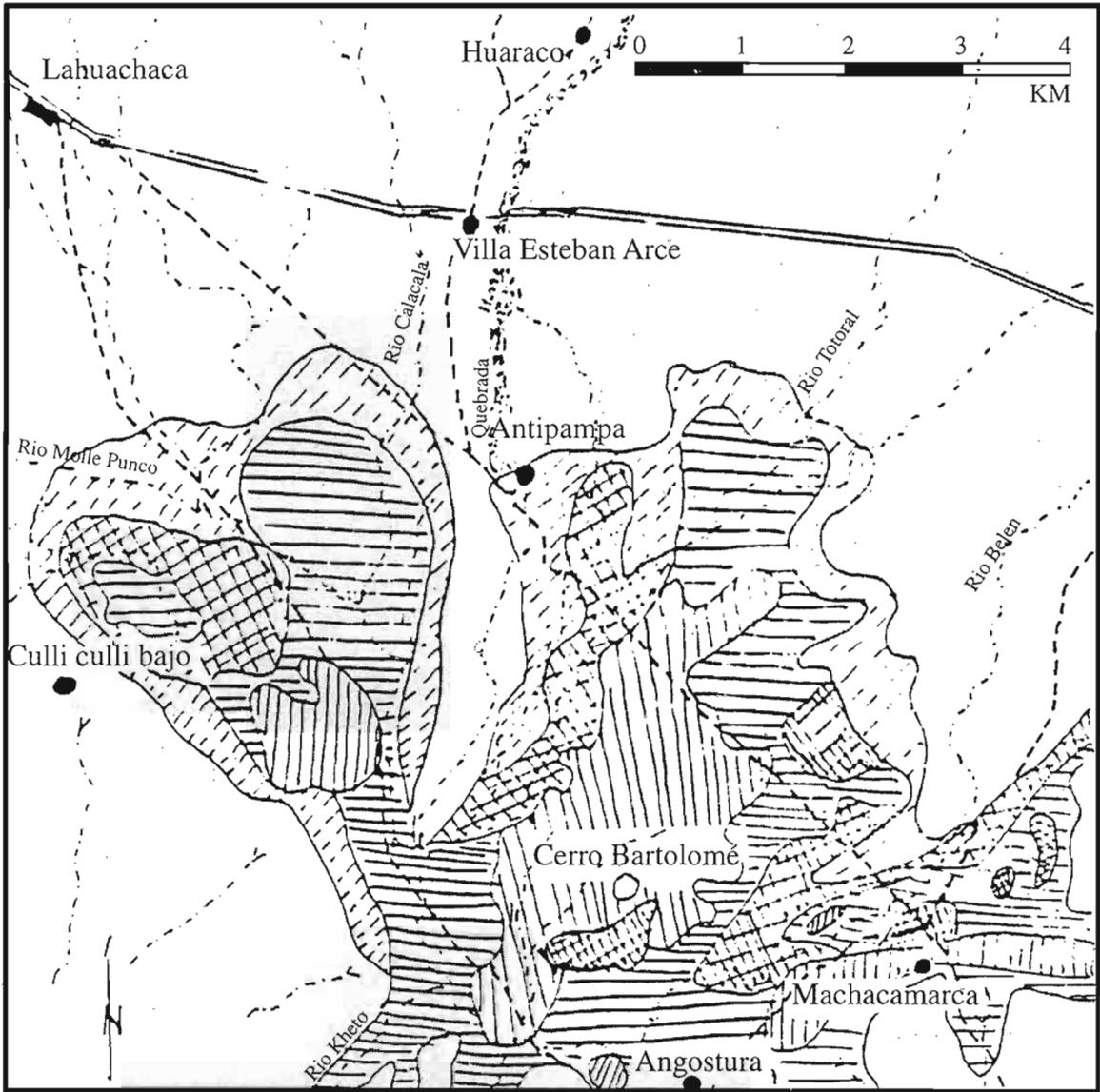


Figura 4.1. Mapa de suelos salinos/sódicos en la llanura de inundación Sur Villarroel (Moreau, LANDSAT TM de noviembre 1986)



Salinidad del suelo (g sal / kg suelo)

0.5

0.5 - 2

2 - 4

4 - 8

> 8

● Comunidades

--- Ríos intermitentes

==== Carretera La Paz - Oruro

- - - - Caminos secundarios

Figura 4.2 Mapa de suelos salinos en la llanura no inundable (Esteban Arce, Aroma) (Salm & Gehler, 1987)

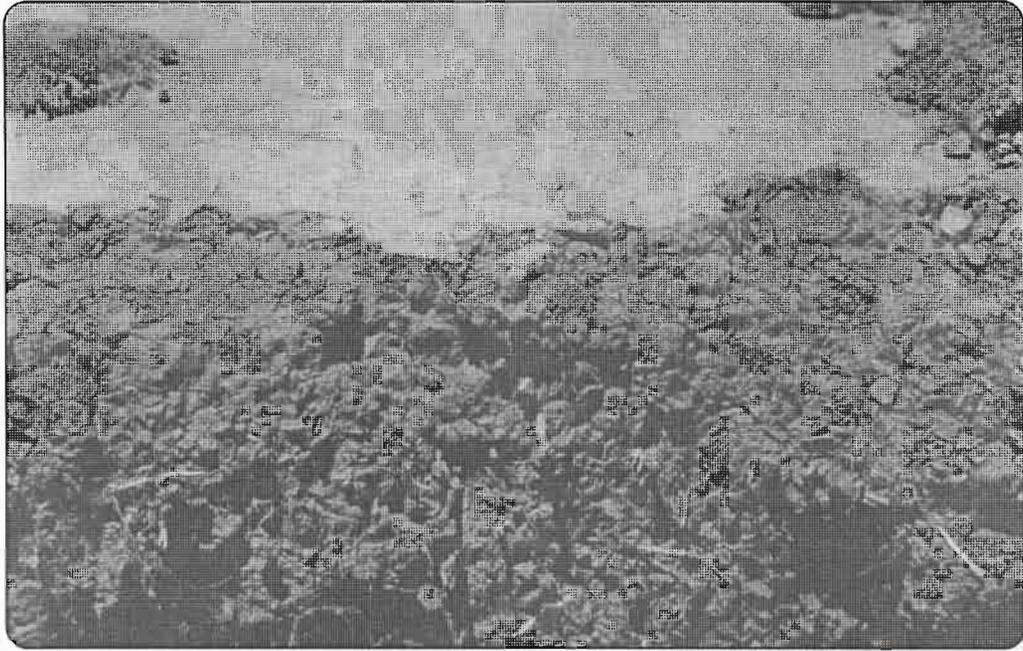


Foto 4.1. Costra y horizonte superficial, San Miguel, Villarroel (Hervé).

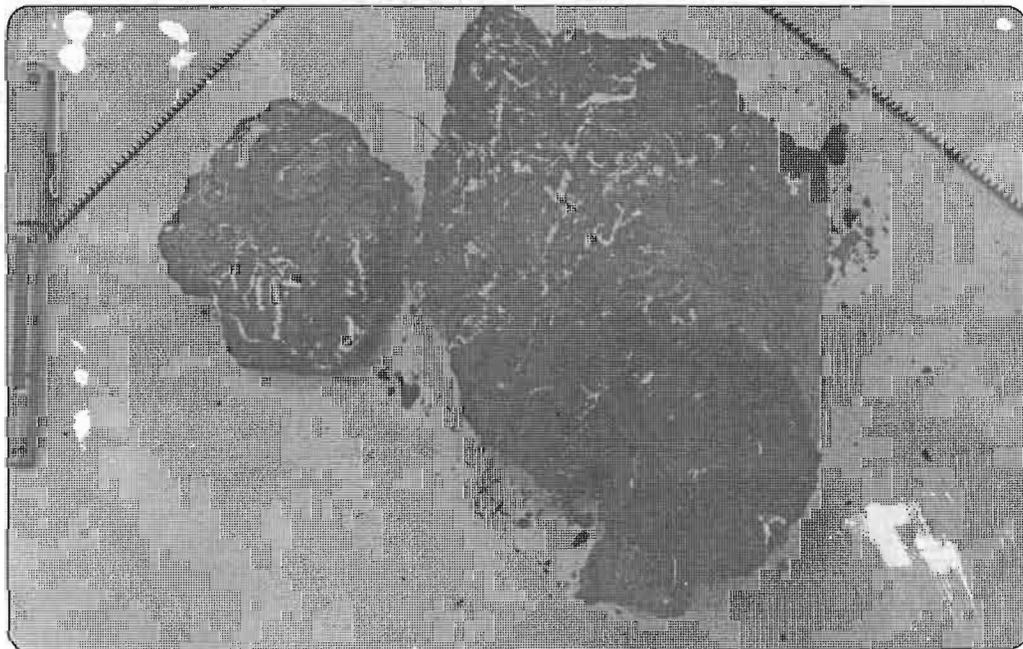


Foto 4.2. Terrón con depósito de yeso, Laruta Villarroel (Hervé).

4.3. Problemática del análisis de suelos salinos y sódicos (J. Chungara)

Introducción

El término suelo es usado con diversos significados por los agrónomos, para designar un cuerpo tridimensional con forma, superficie y profundidad (Soil Survey, 1951), o un perfil que posee profundidad pero no necesariamente forma o área. En esta contribución, se usará el término suelo aplicándolo a muestras que representan capas o puntos en el perfil. Los suelos salinos y sódicos han sido separados en tres grupos: suelos salinos, suelos sódicos-salinos y suelos sódicos no salinos. Pueden diagnosticarse con base en las determinaciones hechas en muestras de suelo. Pero sus análisis presentan una serie de dificultades, en particular la granulometría, la conductividad, el pH y los cationes. Las interacciones con la granulometría y la mineralogía de las arcillas son presentadas en el anexo 3, (1) y (2), respectivamente. Se detalla aquí los procedimientos analíticos de los análisis químicos, insistiendo en estas dificultades y recalcando algunas recomendaciones para la interpretación de los resultados.

4.3.1. Variables y métodos de análisis

REACCIÓN DEL SUELO - pH

El pH de una solución acuosa es el logaritmo negativo de la actividad del ion hidrógeno. Su valor puede determinarse con el potenciómetro, usando diversos electrodos, o colorimétricamente, mediante indicadores que cambian de color con la actividad del ion hidrógeno. Existe cierta duda, con relación a la propiedad exacta que se mide, cuando los métodos que se usan para determinar el pH de las soluciones se aplican a suspensiones de suelo en el agua. Sin embargo, se obtienen valores aparentes del pH, los cuales dependen de las características del suelo, la concentración de bióxido de carbono disuelto y el contenido de humedad la cual se efectúa la lectura. El pH del suelo está influenciado por la composición de los cationes intercambiables, la naturaleza de los materiales de intercambio catiónico, la composición y concentración de las sales solubles y la presencia o ausencia de yeso y carbonatos de metales alcalino térreos.

Las experiencias y estudios estadísticos de Fireman & Wadleigh (1951) permiten establecer los siguientes conceptos con relación al pH de pastas de suelos saturados: (1) pH de 8.5 o mayores indican casi siempre un porcentaje de sodio intercambiable superior o igual a 15% y la presencia

de carbonatos de metales alcalino térreos; (2) en suelos cuyo pH es menor a 8.5, el porcentaje de sodio intercambiable puede o no ser mayor a 15%; (3) los suelos cuyo pH es menor a 7.5, casi nunca contienen carbonatos de metales alcalino térreos, y si el pH es menor a 7.0, el suelo seguramente contendrá altas cantidades de hidrógeno intercambiable.

CATIONES Y ANIONES SOLUBLES

Cuando se analizan los suelos salinos y sódicos para determinar cationes y aniones solubles, el objetivo principal es el de establecer la composición de las sales solubles presentes. La determinación de los cationes da indicaciones sobre la conductividad eléctrica y la presión osmótica. Las concentraciones relativas de los diversos cationes en los extractos de agua del suelo también dan información sobre la composición de los cationes intercambiables del suelo.

Los cationes y aniones solubles que generalmente se determinan en los suelos salinos y alcalinos, son: calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos, aunque a veces se determinan también nitratos y silicatos solubles. Al hacer un análisis completo, si la suma de los cationes expresada en equivalentes sobrepasa a la de los aniones, conviene determinar nitratos. En los suelos sódicos con pH alto se encuentran altas concentraciones de silicatos solubles.

CATIONES INTERCAMBIABLES

Cuando una muestra de suelo es colocada en la solución de una sal como el acetato de amonio, se produce en el suelo una adsorción de iones amonio con desplazamiento de una cantidad equivalente de cationes del suelo hacia la solución. Esta reacción se denomina “intercambio de cationes” y los cationes que se desplazan del suelo se llaman “cationes intercambiables”. Los constituyentes superficiales activos de los suelos que tienen propiedades de intercambio de cationes se llaman en conjunto “complejo de intercambio” y consisten en su mayor parte de minerales arcillosos y materia orgánica. La cantidad total de cationes intercambiables que un suelo puede retener se denomina “capacidad de intercambio catiónico” y generalmente se expresa en miliequivalentes por 100 gramos de suelo. Los cationes intercambiables influyen en forma

determinante en las propiedades físicas y químicas del suelo. Los cationes intercambiables influyen en forma determinante en las propiedades físicas y químicas del suelo.

Las determinaciones de las cantidades y proporciones de los diversos cationes intercambiables son de gran importancia, ya que los cationes intercambiables influyen en forma determinante en las propiedades físicas y químicas del suelo. El análisis de los cationes intercambiables en los suelos salinos y sódicos lleva consigo dificultades que ordinariamente no se encuentran en los suelos de las regiones húmedas. Estos suelos casi siempre contienen carbonatos de metales alcalino-térreos y una concentración relativamente alta de sales solubles, pudiendo tener baja permeabilidad al alcohol y a soluciones acuosas. Cualquier solución que sea capaz de desplazar los cationes intercambiables de los suelos disuelve casi la totalidad de las sales solubles así como una buena proporción de los carbonatos de calcio y magnesio que se encuentran en el suelo. Las sales solubles no deben lavarse del suelo antes de la extracción de los cationes intercambiables, debido a cambios de importancia que suceden como consecuencia de la dilución e hidrólisis. Por lo tanto, la disolución de las sales requiere determinaciones independientes del contenido de cationes solubles y además que se corrija el análisis de cationes intercambiables por la presencia de sales, pues la presencia de carbonatos de calcio y magnesio impide una exacta determinación del calcio y magnesio intercambiable. Aún más, la baja permeabilidad de muchos suelos alcalinos vuelve engorrosas e inconvenientes las técnicas convencionales de lavado para desplazar los cationes intercambiables.

La solución normal de acetato de amonio es la solución salina que más se recomienda para la extracción de los cationes intercambiables y para la saturación del complejo de intercambio catiónico. Aunque esta solución tiene muchas ventajas, ciertos suelos salinos y alcalinos fijan cantidades apreciables de iones amonio y de potasio bajo condiciones de humedad. No obstante, la fijación del amonio no interfiere en la extracción de los cationes intercambiables, pero los valores obtenidos para la capacidad de intercambio catiónico, cuando se satura con amonio, son bajos en una cantidad igual a la del amonio fijado. Se recomienda por lo tanto, para determinar la capacidad de intercambio catiónico, de usar un catión que no esté sujeto a la fijación señalada.

Para la determinación de potasio, magnesio y calcio intercambiables en los suelos estudiados, se usa el método de Bower *et al.*(1952). En este método las sales se ponen en contacto con acetato de sodio de pH 8.2. Este reactivo disuelve poco los carbonatos, no hay riesgos de insolubilización

del catión y el pH elevado permite obtener un valor máximo de la capacidad de intercambio. La determinación de sodio intercambiable se hace con acetato de amonio después de lavar la muestra de suelo con alcohol repetidas veces. Una manera interesante de obtener el sodio intercambiable así como los otros cationes es determinando los miliequivalentes por 100 gramos de cada catión una vez extraídos con acetato de amonio y este valor se resta del valor en miliequivalentes por 100 gramos de los cationes solubles medidos del extracto de suelos. Recomendamos este método en caso de que los resultados obtenidos con los métodos anteriores no sean los esperados. Se determina la capacidad de intercambio catiónico midiendo los miliequivalentes de sodio adsorbido por 100 gramos de suelo después de tratar la muestra con un exceso de solución normal de acetato de sodio con pH de 8.2, lavado con alcohol y extraído con la solución de acetato de amonio.

Las dificultades que se presentan, cuando se lavan suelos de baja permeabilidad, pueden evitarse agitando y centrifugando los tubos con porciones sucesivas de líquidos de extracción y lavado. El acetato de amonio normal neutro se usa para la extracción de cationes intercambiables y solubles, debido a que su interferencia en métodos analíticos puede ser eliminada fácilmente. Entre los cationes más comunes, el sodio es el más indicado para determinar la capacidad de intercambio catiónico. Como antes se dijo, el amoniaco y el potasio están sujetos a ser fijados en una forma difícilmente intercambiable y la presencia constante de carbonatos de calcio y magnesio, en suelos salinos y sódicos, excluye el uso de extractores que contengan calcio o magnesio. El hecho de que el sodio sea un catión predominante, en la mayor parte de los suelos salinos y sódicos, favorece su uso en la determinación de la capacidad de intercambio catiónico.

El detalle de los pretratamientos y de las determinaciones de cationes intercambiables y de la capacidad de intercambio catiónico, tal como están practicados en el IBTEN (Ledezma & Orsag), esta sintetizado en la figura 4.3. Mayores comentarios del mismo se encuentran en el anexo 4. Se ilustra en el anexo 5 por qué, en suelos salinos, puede ocurrir que la suma de cationes supere la capacidad de intercambio catiónico.

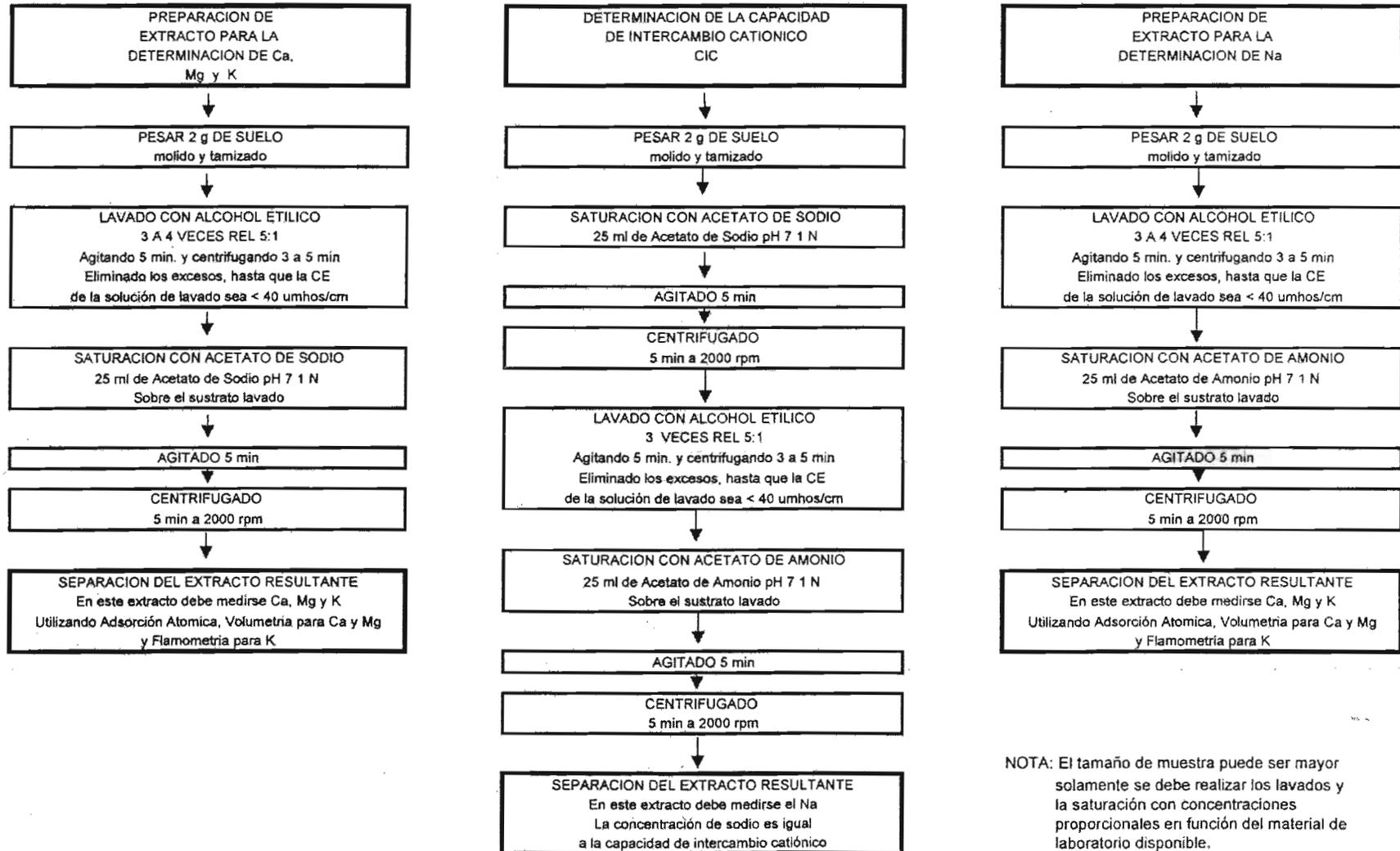


Figura 4.3. METODOLOGIA PARA LA DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO Y CATIONES INTERCAMBIABLES (Ruben Ledezma & Vladimir Orsag, IBTEN)

DETERMINACIONES A PARTIR DE UN EXTRACTO DE SATURACIÓN

EXTRACTO DE SUELO

La justificación del uso de un extracto de saturación se encuentra en el anexo 6. El contenido de la humedad correspondiente a la saturación del suelo es la cantidad máxima de agua que puede retener el suelo sin que, al practicar una depresión en la masa del mismo, se acumule agua libre. La cantidad de muestra de suelo a extraer para realizar esta determinación depende de la textura del mismo y del volumen de la celda de conductividades que se emplea. Se detalla a continuación la manera de determinar el contenido de humedad correspondiente a la saturación del suelo.

Se introduce en un vaso un peso adecuado de sólido que proporcione el volumen que se necesite de filtrado. La primera mitad o los dos tercios del agua necesaria se añade resbalando por las paredes del vaso de forma que pase a través de los grandes capilares. Durante esta fase, el suelo no es perturbado, ya que el movimiento del agua a través de un suelo enfangado es muy lento. Se añaden nuevas porciones de agua hasta que toda la masa de suelo quede humedecida por capilaridad. Es conveniente añadir cantidades pequeñas de agua a las distintas muestras que se hayan de analizar sucesivamente, dejando que para cada una de ellas transcurra todo el tiempo que sea necesario para llegar a la imbibición total de cada porción añadida, antes de añadir una nueva porción de agua a la misma muestra. Seguidamente se agita la muestra mediante una espátula y se añade más agua o más suelo para ajustar definitivamente el contenido de agua. El contenido en agua es el correcto cuando el suelo fluye, apenas para llenar un hoyo practicado con la espátula, fluyendo la mezcla de la espátula y estando la superficie suficientemente húmeda para brillar. Si se practica una depresión en la superficie, no debe acumularse agua en la misma en el transcurso de unos cuantos minutos. Si se acumula agua en las depresiones de la superficie, ello indica que se ha añadido una cantidad excesiva de agua, debiendo añadirse un poco más de suelo para absorber el exceso. Con un poco de práctica se puede reproducir el tanto por ciento de humedad de saturación para el suelo.

DETERMINACIÓN DE LA RELACION SUELO – AGUA

Para realizar las medidas de conductividad, es necesario dejar que se equilibre el suelo saturado. Como el extracto se va a analizar químicamente para determinar la composición iónica, se deja que el suelo saturado de humedad se equilibre durante toda una noche con el fin de que se alcance el equilibrio correspondiente al canje iónico. Este tiempo y aún dos noches son necesarios para los tipos de suelos salinos en virtud de que la capilaridad es pequeña y el humedecimiento es moroso en tiempo, siendo necesario agitar con espátula levemente.

Para la determinación de la relación suelo – agua, es decir la cantidad de suelo contenida en un mililitro de agua, es necesario conocer el peso de suelo seco inicial y la cantidad de agua añadida para obtener la pasta. Se pesa un vaso de vidrio de 600 ml completamente limpio y seco (peso A), se añade una cantidad de suelo entre 100 – 200 gr. al vaso que se encuentra sobre la balanza, se anota el nuevo peso de vaso + suelo seco (Peso B). Posteriormente se procede a obtener la pasta saturada como se indica en 1) y se deja reposar hasta el día siguiente. Una vez que se tenga el extracto adecuado de acuerdo a 1), se vuelve a pesar (Peso C) y se procede a la filtración en un embudo de Buchner grande separándose el “extracto de saturación” por succión. El peso del suelo se obtiene restando $B - A$ y el volumen de agua se obtiene restando $C - B$, suponiendo que la densidad del agua es 1 g/ml. La relación suelo agua es la división del peso del suelo en gramos por el volumen de agua en mililitros.

Es necesario notar que la compactación de los suelos salinos y salino sódicos dificulta el paso del agua y esto se nota cuando se trata de obtener la pasta y cuando se trata de filtrar. Estas dificultades se superan con práctica para la obtención de la pasta y un mayor tiempo de equilibrio, en casos especiales hasta dos noches. El problema de la filtración se supera con un embudo de tamaño adecuado y con la obtención de una cantidad (50 ml) suficiente para los análisis químicos más importantes del suelo. El pH se mide con electrodos de vidrio a causa de sus ventajas, apenas obtenido el extracto de saturación.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Se mide la conductividad eléctrica de la misma manera que el pH, es decir, inmediatamente obtenido el extracto de saturación. En laboratorio no es dificultosa su medida en virtud de que el equipo disponible permite la medida del pH y de la CE al mismo tiempo. Las unidades son en milimhos por centímetro cuadrado ó mili siemens (mS).

CATIONES SOLUBLES

Los cationes que se miden del extracto de saturación son: Sodio, Potasio, Magnesio y Calcio.

- Para la determinación de sodio y potasio se utiliza el método de espectroscopía de emisión atómica, habitualmente el rango de trabajo para ambos es de 10 ppm. En suelos salinos y salino-sódicos se mide el potasio directamente a partir del extracto de saturación. En cambio, para el análisis del sodio es necesario diluir 100 veces el extracto.

- Para calcio y magnesio utilizamos el método de la espectroscopía de absorción atómica, siendo necesario añadir a la muestra una solución de lantano para minimizar interferencias de silicatos y fosfatos sobre los resultados que se reportan en mg de catión por kilogramo de suelo seco.

ANIONES SOLUBLES

Los aniones que analizamos son cloruros, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos. Los aparatos usados son una bureta, pipetas, frascos erlenmeyer.

- Para cloruros valoramos la muestra con una disolución de AgNO_3 (disolución nitrato de plata 0.05 N), en presencia de iones $\text{CrO}_4^{=}$ (indicador cromato potásico 5% en agua). *Del extracto de saturación de suelos salinos, tomar 1 a 5 ml de alícuota en un erlenmeyer de 125 ml, añadir agua hasta 50 ml, añadir 1 ml de disolución de cromato, valorar con el nitrato de plata 0.05 N hasta la aparición del primer color rojo permanente como consecuencia de la precipitación del Ag_2CrO_4 . Se valora un blanco con 50 ml de agua libre de cloruros.*

- La valoración de carbonatos y bicarbonatos se realiza con ácido sulfúrico (H_2SO_4 0.05 N valorado) e indicadores de pH, fenolftaleína y anaranjado de metilo. *A unos 10 ml del extracto de saturación se añaden 0.15 ml de indicador fenolftaleína y si se produce color rosa indica la*

presencia del ión $\text{CO}_3^{=}$ (carbonato normal). El ión $\text{CO}_3^{=}$ se valora mediante H_2SO_4 0.05N, añadiendo una gota cada 2 ó 3 segundos hasta que desaparezca el color. La lectura de la bureta multiplicada por 2 da la cantidad de $\text{CO}_3^{=}$ en meq por litro.

A la disolución resultante de la valoración del $\text{CO}_3^{=}$, o a la disolución original si no se produjese el color rosa, se añade 0.1 ml de anaranjado de metilo y se continúa la valoración (sin volver a cargar la bureta) hasta observar el primer cambio en el color del anaranjado de metilo. Se anota la lectura total de la bureta. La disolución se conserva para realizar la determinación de cloruros.

En caso de que el ión $\text{CO}_3^{=}$ no estuviese presente, la lectura de la bureta expresada en mililitros es numéricamente igual al número de meq de HCO_3^- por litro o a los equivalentes por un millón de partes de la disolución. Si la disolución contenía $\text{CO}_3^{=}$, el volumen correspondiente a los $\text{CO}_3^{=}$ se multiplica por dos y se sustrae del volumen total consumido, y la diferencia indica los meq de HCO_3^- por litro o los equivalentes por millón de partes de la disolución. Se deben realizar ensayos en blanco con los reactivos y sustraerlos de las determinaciones.

- Para la determinación de sulfatos, utilizamos el método turbidimétrico.

Se usa los siguientes reactivos:

- 5% de clorhidrato de hidroxilamina en agua (preparar antes de usar).
- Reactivo BaCl_2 : mezclar 20 ml de Tween 20 y 100 ml de solución de 10% de BaCl_2 . Equilibrar por 24 horas. Esa solución se diluye 10 veces antes de usarse.
- Stock de 1000 ppm de $\text{SO}_4^{=}$. El rango de trabajo es de 2 a 20 ppm.

Se transfiere una alícuota a un matraz de 10 ml. Se añade 1 ml de Clorhidrato de hidroxilamina y 2 ml de reactivo BaCl_2 . Se agita enérgicamente por 10 minutos y directamente se mide la absorbencia 4 00 nm. Los patrones se tratan de similar manera.

CATIONES INTERCAMBIABLES : POTASIO, CALCIO, MAGNESIO, SODIO

Se utilizan agitadores mecánicos, centrifugadora, balanza, equipos de absorción atómica y emisión atómica (flamómetro), matraces de vidrio de varios tamaños y los siguientes reactivos: Acetato de sodio 1 N., alcohol absoluto de 98 %, óxido de lantano, patrones de Ca, Mg, K; Acetato de amonio 1 N., alcohol absoluto de 98 %, patrones de Na.

- Para K, Ca y Mg, se coloca 1.5 a 2 g. de suelo en un tubo de centrifugadora, se añade 25 ml de acetato de sodio, se agita mecánicamente por 5 minutos, se lleva a la centrifugadora por 15 minutos a 2000 rpm. Se transfiere el extracto a un recipiente adecuado: un vial de vidrio de 25 ml del extracto se mide K, Ca, Mg. El suelo que queda en el tubo se lava con alcohol para luego determinar la capacidad de intercambio catiónico. El potasio se determina por espectrometría de emisión atómica. El calcio y el magnesio se analizan por espectroscopia de absorción atómica utilizando óxido de lantano para minimizar interferencias.

- Para Na, se coloca 1.5 a 2 g. de suelo en un tubo de centrifugadora, se lava varias veces de 3 a 4 veces con alcohol en una proporción de 1 en 5: 1 g de suelo por 5 ml de alcohol, hasta que el alcohol desechado de la centrifugadora tenga un valor de CE menor a 40 mS. Se añade 25 ml de acetato de amonio, se agita mecánicamente por 5 minutos, se lleva a la centrifugadora por 15 minutos a 2000 rpm. Se transfiere el extracto a un recipiente adecuado, un vial de vidrio de 25 ml, y se mide Na por espectrometría de emisión atómica.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Se añade al sustrato residual del análisis de Ca, Mg y K intercambiables alcohol, se lava 3 a 4 veces con alcohol en una proporción de 1 en 5: 1 g de suelo por 5 ml de alcohol, hasta que el alcohol desechado de la centrifugadora tenga un valor de CE menor a 40 mS. Se añade 25 ml de acetato de amonio, se agita mecánicamente por 5 minutos, se lleva a la centrifugadora por 15 minutos a 2000 rpm. Se transfiere el extracto a un recipiente adecuado: un vial de vidrio de 25 ml se mide Na por espectrometría de emisión atómica. El valor numérico del sodio en meq por 100 g es igual a la capacidad de intercambio catiónico.

CARBONATO TOTAL

La cantidad de CaCO_3 presente en el suelo se calcula de la cantidad de H_2SO_4 que reacciona de la siguiente manera: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Se añade un exceso de H_2SO_4 y se titula en retroceso con NaOH .

Para esta determinación se necesita una balanza de precisión, buretas y un erlenmeyer de 500 ml, y los siguientes reactivos: H_2SO_4 (0.5 N) y NaOH (0.5 N), 100 ml de fenolftaleína: 1 g en 100 ml de etanol (96%), 60 ml de rojo de metilo: 0.1 g en 100 ml de etanol (96%), 40 ml de verde de bromocresol + 80 ml de agua + 5.7 ml de NaOH 0.01 N.

El procedimiento es el siguiente:

- a) Normalizar la solución de hidróxido de sodio.*
- b) Colocar 1 g de muestra de suelo en erlenmeyer de 500 ml. Añadir 25 ml de H_2SO_4 0.5 N y llevar a un volumen de ± 150 ml con agua destilada. El erlenmeyer se coloca en un baño de agua caliente por una hora. Después de enfriado se añade 0.5 ml de la mezcla de indicadores y se titula con NaOH 0.5 N. Cuando el color rojo cambia a verde, el NaOH se añade gota a gota, el punto final se alcanza cuando el color cambia a rojo intenso.*
- c) Un blanco (sin suelo) se corre de la misma manera que las muestras.*
- d) Para los cálculos, la cantidad de H_2SO_4 que ha reaccionado con el carbonato es:*

$(a - b) * N = \text{meq CaCO}_3$ *dónde: N = Normalidad de NaOH, a = ml de NaOH añadidos al blanco, b = ml de NaOH añadidos a la muestra.*

Ya que: 1 meq $\text{CaCO}_3 = 50 \text{ mg CaCO}_3$,

$(a - b) * N * 50 = \text{mg CaCO}_3$ presentes en 1 g de suelo ó $\% \text{CaCO}_3 = (a - b) * N * 5$.

4.3.2. Claves de verificación de los resultados del análisis químico

Un medio de establecer si hay errores en los análisis químicos de los suelos es interpretar las relaciones que existen entre los valores que se obtienen con diversas determinaciones. Por lo tanto, la comprensión de los principios que estas relaciones involucran facilita la interpretación de los análisis y, en el caso de los suelos salinos, la verificación de los resultados de los análisis químicos.

- Conductividad eléctrica y concentración total de cationes. La CE de las soluciones y de los extractos de saturación, expresada en mmhos.cm^{-1} a 25 °C y multiplicada por 10, es aproximadamente igual a la concentración total de cationes solubles expresada en m.e.l^{-1} .

- Concentración de cationes y de aniones. La concentración o el contenido total de aniones solubles y la concentración o el contenido total de cationes solubles son casi iguales cuando se expresan en forma equivalente.

- pH. Si, en un extracto de saturación, se encuentran carbonatos y bicarbonatos por titulación, el pH del extracto deberá ser mayor que 9.0. La concentración de bicarbonatos raramente excede de 10 m.e.l^{-1} . En ausencia de carbonatos y si el pH es de 7 o menos, rara vez pasará de 3 a 4 m.e.l^{-1} .

La concentración de calcio y magnesio en un extracto de saturación raramente excede de 2 m.e.l^{-1} para lecturas de pH mayores de 9.0. Por lo tanto, el total de calcio y magnesio será bajo si hay iones carbonato en cantidades titulables, y la suma de calcio más magnesio nunca es alta en presencia de una alta concentración de iones bicarbonato.

En relación a carbonatos de metales alcalino térreos, el pH del extracto de un suelo calcáreo a por ciento de saturación, invariablemente es mayor a 7.0 y generalmente mayor a 7.5, un suelo no calcáreo puede tener un pH hasta de 7.3 a 7.4. Si el pH del extracto de saturación es mayor a 8.5, con toda seguridad, el PSI será igual o mayor a 15.

- Calcio y sulfato en un extracto de suelo agua y contenido de yeso en el suelo. La solubilidad del yeso a temperatura ordinaria es de unos 30 m.e.l^{-1} en agua destilada y de 50 m.e.l^{-1} o más en soluciones muy salinas. Sin embargo, debido al efecto del ión común, un

exceso de calcio o sulfato puede causar que disminuya la solubilidad del yeso hasta unos 20 m.e.l⁻¹. Por lo tanto, el extracto de saturación de un suelo no yesífero puede contener más de 30 m.e.l⁻¹ de calcio y sulfato (como en el suelo salino No. 756, Cuadro 1) y un suelo yesífero puede tener una concentración de calcio hasta de 20 m.e.l⁻¹. Debido a esto, por regla general, en los suelos cuyo contenido de calcio y magnesio en su extracto de saturación es mayor a 20 m.e.l⁻¹, deberá comprobarse su contenido de yeso.

- CIC y PSI. Debido a que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y las propiedades de retención de humedad se relacionan con la textura del suelo, generalmente existe una aceptable relación entre ambas propiedades, especialmente en aquellos suelos de idéntico material de origen.

4.3.3. Recomendaciones

Extracto de suelo

La obtención de extracto de suelo es más conveniente hacerla en suelo tamizado a 1 mm, debido a que los suelos son sódicos, alcalinos, y tienen muy baja permeabilidad, lo que dificulta el ataque a partículas de suelo tamizadas a 2 mm o más. En ocasiones es necesario dejar reposar más de 24 horas el extracto a fin de tener un extracto que represente las características buscadas. No es fácil el manejo de la pasta saturada; a veces, es dificultoso tratar de remover con varillas de vidrio o espátulas debido a la resistencia de la pasta saturada, en estos casos recomendamos añadir un poco más de agua para obtener la pasta saturada adecuada.

Determinación de la relación suelo – agua

Para la determinación del por ciento de saturación, no es necesario llevar un volumen de agua determinado, porque suponiendo que la densidad del agua es de 1 g/ml basta con pesar el vaso que contiene el suelo y el agua y mediante restas obtener el peso del agua y la equivalencia en volumen.

pH

La determinación de pH es mejor hacerla en extracto de suelos y no así en soluciones con relación 1:2 ó 1:5 u otra porque aquella refleja de mejor manera las condiciones en que se encuentra el suelo en el campo. La cantidad adecuada de extracto que se requiere para esta medida es de 25 a 50 ml.

Conductividad eléctrica

La determinación de conductividad eléctrica es mejor hacerla en extracto de suelos de la misma manera que el pH. La cantidad adecuada de extracto para su determinación es de 25 – 50 ml. En caso de usarse equipos cuyo valor máximo de medida es inferior a la conductividad de soluciones con alto contenido de sales, se recomienda diluir la solución 1:2, 1:3, etc. hasta encontrar un valor dentro del rango de medida de los equipos.

Cationes solubles

La determinación de los diversos cationes se debe hacer tan pronto como se obtenga la pasta saturada, debido a que el almacenamiento por un tiempo puede alterar el contenido de sales. Para la medición de calcio y magnesio en absorción atómica, recomendamos el uso de óxido de lantano para minimizar la interferencia de sustancias como fosfatos ó silicatos que interfieren en la medición de los cationes. Para la determinación de potasio basta con una medida directa o en caso necesario poca dilución. En cambio, para la determinación de sodio, se debe diluir al menos dos veces para hacer una medida adecuada al rango de medida del instrumento.

Aniones solubles

Al igual que los cationes la determinación de los aniones se hace tan pronto se obtenga la pasta saturada. Especialmente se debe analizar carbonatos y bicarbonatos inmediatamente porque el pH de la pasta y un lapso de tiempo de almacenamiento alteran los resultados de esos aniones. Para los suelos salinos, alícuotas de 5 – 10 ml y titulación con H_2SO_4 de 0.02 N son suficientes. Para el análisis de cloruro se recomienda usar alícuotas de 1 a 5 ml y titular con un Nitrato de plata de normalidad 0.05. Para el análisis de sulfatos por turbidimetría es muy importante agitar bastante tiempo 3 – 5 minutos la solución a medir en el colorímetro.

Cationes intercambiables

Potasio, calcio, magnesio intercambiables

Los cuidados para el análisis en los equipos son los mismos que para los cationes solubles. Se recomienda los valores que se obtienen usando acetato de sodio de pH 8.2 porque se encuentran dentro de los valores esperados. En caso de que los valores de calcio sean muy mayores a 15 meq/100 g., es preferible usar un extractante como cloruro de bario – Trietanol amina para obtener valores de calcio más adecuados.

Sodio intercambiable

El lavado con alcohol se debe hacer de una manera muy completa, hasta que el alcohol de lavado tenga una C.E. inferior a 20 μ mhos/cm, a veces se hace necesario lavar hasta 5 – 6 veces para obtener esos valores. El contenido de alcohol de lavado cada vez debe estar en una cantidad de 5 por cada gramo de suelo. Cuando se tienen valores muy grandes de sodio intercambiable, se recomienda obtener el valor restando el valor obtenido del valor de sodio soluble, ambos resultados en miliequivalentes por 100 gramos.

Capacidad de intercambio catiónico

Para la obtención del valor de la capacidad de intercambio catiónico no es necesario lavar inicialmente con alcohol el suelo, es mejor extraer directamente con acetato de sodio. El extracto obtenido se usa para el análisis de Ca, Mg y K, la pasta se lava con alcohol también varias veces hasta obtener un alcohol de conductividad menor a 20 mmhos/cm, entonces se mide el valor del sodio que es equivalente al valor de la capacidad de intercambio catiónico.

Carbonato total

Se debe prestar especial atención al calentamiento de la solución con ácido sulfúrico para expulsar todo el carbonato, un calentamiento a baja temperatura y por poco tiempo no garantiza buenos resultados.

4.4. Efecto de sales, sodio y boro, sobre las propiedades del suelo (V. Orsag)

4.4.1. Características generales de las sales presentes en suelos salinos

De acuerdo a Porta *et al.* (1994), los suelos y aguas de las zonas semiáridas y áridas contienen importantes concentraciones de cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y nitratos de sodio, magnesio, calcio o potasio. En los suelos salinos, las sales que se acumulan por procesos naturales y/o antrópicos presentan una gran complejidad y variabilidad espacial y temporal en función a la temperatura y humedad del medio en que se cristalizan. Además, cada sal tiene una toxicidad específica para las plantas (cuadro 4.8).

Cuadro 4.8. Sales y toxicidad en suelos salinos

CLASE		PRESENCIA EN SUELOS SALINOS	SOLUBILIDAD $g l^{-1}$	TOXICIDAD PARA LAS PLANTAS
CLORURO	De sodio	Común	264	+++
	Magnesio	Común	353	++++
	Cálcico	Rara	400-500	++
	Potasio	Baja	Elevada	+
SULFATO	Sódico	Común	F(t)	++
	Magnesio	Común	262	++++
	Potasio	Baja	Elevada	+
CARBONATO	Sodio	Suelos Sódicos	178	+++++
BICARBONATO	Sodio	Suelos Sódicos	262	++++

Fuente : Porta et al. (1994).

Cloruros

Los cloruros que, por ser muy solubles, presentan alta toxicidad y los sulfatos son las sales más comunes en los suelos salinos. El cloruro de sodio es la sal más frecuente que constituye en las épocas secas eflorescencias con gusto salado. La presencia de NaCl afecta la solubilidad de otras sales por efecto del ión común (Kovda y Cools 1967). De acuerdo a los trabajos de Basslavskaya y Syroeshkina (1936), los cloruros disminuyen las actividades de la fotosíntesis en las papas. Harris

(1915) indica que los cloruros son más tóxicos que los sulfatos para la germinación de las plantas y determina la toxicidad relativa de las sales solubles: $\text{NaCl} > \text{Ca Cl}_2 > \text{K Cl} > \text{MgCl}_2 > \text{KNO}_3 > \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 > \text{Na}_2 \text{SO}_4$. Los nitratos de sodio son muy solubles y tóxicos pero se encuentran raras veces en los suelos salinos.

La acumulación de cloruros de magnesio se produce en los suelos con una salinidad extremadamente alta. Es una sal altamente tóxica y muy perjudicial para las plantas. Se puede formar si el suelo recibe aguas ricas en iones de Cl^- y Na^+ , los que reaccionan con el Mg intercambiable del suelo. La presencia de cloruros de magnesio en el suelo hace que su superficie se mantenga húmeda por mucho tiempo después de una lluvia o un riego. Esto se debe a que esta sal es muy higroscópica y puede absorber agua del aire. Sus eflorescencias tienen un sabor amargo. El lavado de los suelos que contienen concentraciones elevadas de cloruros de magnesio es muy difícil, ya que por efecto de la dilución de valencia, el Mg^{2+} tendrá a ocupar sedes de intercambio desplazando a los iones monovalentes durante el lavado, según la Ley de Gapon.

La fórmula de Gapon permite definir el equilibrio entre la solución externa e interna, en función de las actividades de los iones que hay en estas dos soluciones. En dicha fórmula intervienen las concentraciones relativas de los iones en las dos soluciones externa e interna. Sin embargo el valor de estas concentraciones debe ser corregido por un coeficiente de actividad (f) del ión que expresa el grado de agitación del ión en la solución.

La actividad es inversamente proporcional a la concentración, pero depende también de la valencia e hidratación: $\text{Actividad} = \text{concentración} \times f$

En soluciones muy diluidas la actividad es máxima, su valor es sensiblemente el de la concentración, siendo f aproximadamente igual a 1.

Si la concentración aumenta la actividad disminuye, disminuye más rápidamente para los iones bivalentes que para los monovalentes y más rápidamente para los iones hidratados que para los menos hidratados. Como la actividad de los iones aumenta con la dilución, el ión más diluido tiene tendencia a ser relativamente más adsorbido que el más concentrado.

Si se indica la concentración por medio de paréntesis, la fórmula de Gapon da la expresión siguiente:

Indice i = Solución interna (iones adsorbidos)

Indice e = Solución externa (iones libres en solución)

$$\frac{(K)_i}{(Ca)_i} = k \frac{f(K)_e}{f(Ca)_e}$$

Como la actividad de los iones bivalentes interviene por la raíz cuadrada en el segundo término de la igualdad precedente, se deduce que son absorbidos más fuertemente que los monovalentes.

Tomando en cuenta que las concentraciones del suelo varían en el tiempo (época de lluvias y época seca), es necesario considerar que la dilución aumentará más la actividad de los cationes bivalentes que la de los monovalentes. En este sentido, en época de lluvias son más absorbidos los bivalentes como el calcio evitando la sodificación de los suelos, aspecto a considerar en los suelos del Altiplano. Esta comprobación explica el lavado preferencial de los monovalentes con relación a los bivalentes en época húmeda, y el paso preferencial a la solución del suelo de los monovalentes, que coincide con un lavado más intenso (más agua), mientras que en la época seca las soluciones son más ricas en bivalentes pero no hay lavado.

El cloruro de calcio es una sal muy poco común en los suelos salinos, debido a su mayor estabilidad que otras sales. El cloruro de potasio tiene propiedades análogas a las del cloruro de sodio, sin embargo, es muy poco frecuente en los suelos salinos debido a que el K es retenido de una manera más fuerte por las arcillas del suelo. Además, el potasio es un macronutriente por lo que queda inmovilizado en la biomasa.

Sulfatos

El sulfato sódico es un componente frecuente en los suelos salinos; sus eflorescencias tienen un sabor a jabón y salado donde se distinguen:

Na_2SO_4 (Tenartita) en desiertos y periodos de sequía,

$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Mirabilita) en la estación húmeda.

La solubilidad de los sulfatos depende de la temperatura. Al igual que otras sales durante el periodo seco se acumulan en la superficie del suelo donde forman eflorescencias blancas y en la época húmeda pueden ser lavadas si las temperaturas y las características del suelo favorecen esta situación. El sulfato magnésico es un constituyente frecuente, muy soluble y altamente tóxico; su lavado es dificultoso. El sulfato de potasio no es responsable de la salinización de los suelos. La toxicidad relativa de los sulfatos es: Sulfato de Mg > Sulfato de K > Sulfato de Na.

Carbonato y Bicarbonato sódico

La presencia de carbonato y bicarbonato sódico indica unas condiciones físico químicas especiales del suelo ligadas a procesos de alcalinización o sodificación (ESP > 15%), donde el porcentaje de sodio intercambiable es mayor al 15% de la CIC.

Los suelos con carbonatos y bicarbonatos de sodio tienen un pH superior a 9, pudiendo llegar a 12. Esta fuerte alcalinidad crea un medio inadecuado para el crecimiento de la mayoría de las plantas. La hidrólisis del carbonato sódico es el origen de valores de pH tan elevados:



Los efectos desfavorables del Na_2CO_3 se dejan sentir a partir de concentraciones del orden de 0,05 a 0,1 % de esta sal. El bicarbonato sódico da lugar a unas condiciones menos alcalinas y por consiguiente menos tóxicas: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaHCO}_3$

En medios naturales donde el yeso es parte de los suelos, el carbonato sódico tenderá a desaparecer: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Interacciones sales - arcillas

De acuerdo con varios autores, una cantidad elevada de sales en el suelo mantiene floculados los coloides del suelo, de manera que puede parecer que el suelo tiene una buena condición granular. Sin embargo, un aumento del contenido de sodio intercambiable en el suelo dispersa las arcillas, solubiliza la materia orgánica, hidroliza el sodio con un consecuente aumento del pH y favorece el encostramiento superficial y sellado del suelo (disminución de la estabilidad estructural, la porosidad, la capacidad de retención de humedad, la permeabilidad y la aireación).

Según Shainberg & Letey (1984) la estructura del suelo puede degradarse al utilizar una agua de riego de baja concentración de electrolitos y por una elevada concentración de sodio en el complejo de cambio. En general según Porta et al. (1994) la concentración total y el tipo de sales por un lado, y la cantidad y mineralogía de las arcillas por otro, determinan la naturaleza de las interacciones entre el agua y la matriz del suelo. En el caso de los suelos del altiplano, las arcillas son de tipo illitas (Hervé *et al.*, 2001) como en otras partes del bloque andino oriental de Bolivia (Orsag & Blanco, 2001).

Las montmorillonitas, cuando están saturadas de calcio, presentan una unión de láminas paralelas en paquetes denominados "tactoides". La sodificación conduce en una primera fase a la dispersión de los tactoides, que pueden migrar y colmatar los poros de los horizontes subyacentes (proceso irreversible), produciendo una disminución de la conductividad hidráulica. El aumento del PSI (Por ciento de Sodio Intercambiable) también provoca el colapso de los tactoides (PSI mayor a 50%) y si el PSI está entre 15 a 20%, la expansión de las partículas de arcilla es un proceso reversible pero el cambio en la geometría de los poros sigue afectando negativamente la conductividad hidráulica. Las arcillas sódicas desarrollan presiones de hinchamiento elevadas por lo que las partículas se hallan dispersas y la estructura degradada.

Según Porta *et al.* (1994), últimamente se ha introducido el concepto de "Valor de Floculación (VF)" para estudiar las relaciones de floculación-dispersión y la permeabilidad del suelo. El Valor de Floculación (VF) o Concentración Crítica de Coagulación (CCC) según Quirk y Schofield (1955), Van Olphen (1977), Golberg y Foster () citados por Porta et al (1994) la definen como: "Concentración del agua que al entrar en equilibrio con el suelo, para un ESP

dado, provoca una disminución de la permeabilidad de un 10 a un 15%”. o bien como: “Concentración mínima de un electrolito necesaria para flocular un coloide disperso dado en un determinado tiempo (24 h)”. En aquellos casos que la concentración de electrolitos es menor que la CCC, tendrá lugar la dispersión.

Los valores de la floculación para distintos tipos de arcilla se pueden apreciar en el cuadro 4.9.

Cuadro 4. 9. Valores de floculación según el tipo de montmorillonita

Mineral	CCC mmol (+)l ⁻¹	Autor
Montmorillonita- Na	7-20	Arora & Coleman (1979)
Montmorillonita- Ca	0.17	Van Olphen (1977)
(CaCl ₂)	0.50	Greene & Cols (1978)

De acuerdo con Porta et al (1994), en el manejo de suelos con riesgo de sodificación habrá que tener en cuenta el valor de floculación para cada PSI, para no producir una degradación de las propiedades físicas del suelo.

Quirk (1986) define una concentración crítica entre Na⁺ y Ca⁺⁺ en el agua de riego:

$$\text{Concentraci3ncr3tica del agua de riego} = 0.56 \frac{Na^+}{Ca^{+2}} + 0.6$$

Según el enfoque de Quirk (1986), un lavado con aguas de alta concentración salina es aplicable a la mejora de suelos salino-sódicos para evitar la expansión y translocación de coloides, y mantener así una conductividad hidráulica adecuada. El sodio irá siendo progresivamente lavado por el efecto de la dilución de valencia.

4.4.2. Caso del Boro

Según la bibliografía, los contenidos de boro varían en la mayor parte de los suelos, aproximadamente entre 20 a 200 ppm. Generalmente el boro se encuentra en forma de turmalina (silicato de boro) y boratos (de sodio, calcio y potasio) o en materiales de origen volcánico. También un mineral importante de boro es la Ulexita o Boronatrocalcita ($\text{CaNaB}_5 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$), que se encuentra muchas veces concentrado en los salares a grandes alturas como en el Altiplano Sur de Bolivia. En la naturaleza el boro es un mineral sólido que se distingue por su alta resistencia a la mineralización. De acuerdo a Lopéz J.R. y López J.M. (1985) el boro se encuentra absorbido en los suelos, formando parte de los minerales primarios, asociado a la materia orgánica o a la arcilla, ó en solución. El ión borato reacciona con los grupos hidroxílicos de la materia orgánica, con óxidos hidratados de aluminio y hierro. El boro adsorbido por la arcilla y la materia orgánica constituye un regulador, gracias al cual se mantiene la concentración del boro en la solución del suelo y hace que las pérdidas por drenaje sean reducidas. Estas formas de boro son las que predominan en los suelos salinos y persisten aún recuperados estos suelos de las sales.

La disponibilidad del boro para las plantas depende de ciertas condiciones:

- El pH más favorable para la movilización del boro es de 5 a 7. El boro disminuye cuando el pH aumenta por encima de 7 pero vuelve a aumentar considerablemente cuando el pH del suelo sube por encima de 8,5. Por consiguiente en los suelos alcalinos las áreas de riego podrían presentar niveles excesivos de boro disponible debido a que las aguas de riego aportan concentraciones importantes de este elemento.
- La materia orgánica de los suelos incide en la accesibilidad del boro para las plantas. Inicialmente este se encuentra en forma inaccesible y solo se vuelve disponible luego de su mineralización.
- También el boro forma con las arcillas, gracias a fenómenos de adsorción, complejos de superficie de esfera interna que resultan muy estables. Por este motivo el lavado de un exceso de boro por lavado resulta difícil en suelos pesados.

De acuerdo a De Broyn (1966) existe un antagonismo entre el calcio y el boro, lo que explica la menor toxicidad del boro en suelos calizos. Esto se puede interpretar por el hecho de que el metaborato inicialmente sódico reacciona con el Ca del agua del suelo y forma metaborato cálcico, cuya solubilidad es considerablemente menor. El boro disponible en el suelo puede ser fácilmente lavado de los suelos, lo que explica cierta deficiencia de este elemento en suelos de percolación elevada.

Se ha establecido que el boro influye principalmente en el desplazamiento de los carbohidratos en las plantas, en el desarrollo y en las funciones fisiológicas de los órganos reproductivos. La deficiencia de boro se manifiesta sobre todo en las partes crecientes más jóvenes de las plantas donde se nota una destrucción de los tejidos jóvenes, la misma que va acompañada de una coloración rojiza o amarillenta de las hojas.

En suelos neutros a moderadamente alcalinos la deficiencia se puede manifestar en los cultivos de alfalfa, donde se nota una disminución sustancial en la producción de semilla o la formación del “cogollo amarillo”, también se presenta problemas en las raíces tuberosas “podedumbre seca”.

En caso de toxicidad por exceso de boro es notoria una coloración amarilla de los extremos de las hojas aunque este no es un indicio específico. En caso de excesos moderados y fuertes se produce una necrosis progresiva en las hojas que comienza desde sus extremos en dirección a sus nervios centrales. El contenido de boro en forma móvil que excede más de 30 ppm es la causa de graves enfermedades no solo en las plantas sino también en los animales. La alfalfa se caracteriza por su capacidad de soportar concentraciones de hasta 25 ppm (Yagodin, 1982). Los límites de tolerancia para el boro en extractos de saturación de pasta saturada han sido establecidos por Wilcox (1960). Se puede indicar que por debajo de $0,7 \text{ mg B l}^{-1}$, los cultivos no se ven prácticamente afectados, entre $0,7$ y $1,5 \text{ mg B l}^{-1}$, se sitúa el límite de marginalidad por encima de $1,5 \text{ mg B l}^{-1}$ y pueden haber problemas de toxicidad más o menos acusada. Entre los cultivos tolerantes a los excesos de boro ($>4,0 \text{ mg l}^{-1}$) tenemos: alfalfa, hortalizas, cultivos muy difundidos en la zona. De acuerdo con López J.R y López J.M (1985) los suelos con contenidos menores a 1 ppm pueden responder a aportes de boro, las concentraciones entre 1 a 5 ppm en los suelos se consideran satisfactorios para la mayoría de los cultivos. Por encima de 5 ppm pueden haber problemas de toxicidad.

4.5. Efectos osmóticos de las sales sobre la disponibilidad de agua para las plantas (S. Jacobsen, H. Bosque, V. Orsag)

Como la facilidad de absorción de agua por las plantas es principalmente una función de la diferencia entre la presión osmótica de las células de la raíz de las plantas y la suma de la presión osmótica de la solución del suelo y de la tensión física en ella, cualquier aumento de la concentración de sales en la solución del suelo hace disminuir el potencial osmótico del agua del suelo (en valor absoluto va siendo cada vez mayor), lo que incide drásticamente en el aprovechamiento del agua por las plantas (Porta et al. 1994).

Los efectos osmóticos llevaron a plantear la Teoría de la Disponibilidad de Agua o de la Sequía Fisiológica. Shimper (1903) indica que en un suelo salino a pesar de que contenga agua, la planta no es capaz de absorberla. Magistad y Reitemeir (1943) encontraron que la presión osmótica de la solución del suelo normalmente fértil irrigado cerca del PMP, varía entre 1,3 y 1,8 atmósferas. El desarrollo de las plantas se limitaba en los suelos en los que la presión osmótica de su solución fuera de 10 atmósferas, basada en el contenido de humedad a una presión de 15 atmósferas. A concentraciones mayores a 40 atmósferas los suelos comenzaban a presentar problemas de esterilidad. Diversos trabajos relacionados con el efecto de las sales, en soluciones de cultivo, sobre las plantas, han demostrado que existe una relación casi lineal reversible entre la presión osmótica de la solución de cultivo y el desarrollo de las plantas (Magistad y Christiansen, 1944).

Hayward y Spurr (1943) realizaron trabajos relacionados a la cantidad de agua absorbida por las plantas bajo diferentes concentraciones de sales y sus resultados muestran claramente que las plantas absorben menor cantidad de agua a concentraciones mayores de sales, en casos extremos puede haber un efecto inverso es decir el paso del agua de la planta al suelo (plasmólisis). Según Bernstein (1961) las plantas, debido al aumento de la presión osmótica, se ven obligadas a realizar un ajuste y "adaptación osmótica" en sus células para poder seguir absorbiendo agua. Este ajuste significa un consumo de energía adicional que se refleja en un menor crecimiento y desarrollo de las plantas. Aceves (1979) atribuye la inhibición del crecimiento a que las sales afectan la división celular y producen un engrosamiento prematuro de las paredes celulares, lo que impide su crecimiento de forma irreversible.

Las halófitas requieren entonces, para su supervivencia en medios salinos, disminuir el potencial hídrico en su sistema, incrementando solutos con el uso de iones presentes en el medioambiente (Na^+ , K^+ y Cl^-) y sintetizando solutos orgánicos. Una característica vital de la fisiología de estas plantas es la habilidad de acumular suficientes iones para mantener el crecimiento y evitar cualquier déficit de agua o exceso de iones, que pueden provocar toxicidad (Flowers y Yeo, 1986; Flowers *et al.*, 1986; Volkmar y Woodbury, 1995; Jacoby, 1998; Poljakoff-Mayber y Lerner, 1998; Prado, 1999).

Otra respuesta fisiológica de las plantas a la salinidad es disminuyendo la conductancia estomática. De este modo, reducen la transpiración, evitando la sequía fisiológica, para mantener la turgencia de las células indispensable para el crecimiento. La reducción de la conductancia estomática implica el cierre de los estomas, relacionada a los factores luz, humedad, CO_2 , temperatura y corrientes de aire, además de la disminución del potencial de agua foliar, incluso por encima de la luz intensa. El cierre de los estomas reduce el ingreso de CO_2 , inhibiendo la fotosíntesis, cuya consecuencia es la reducción en la síntesis de fotosintatos. En general, la consecuencia es la disminución en la producción de biomasa, área foliar y altura de planta (Bernstein y Hayward, 1958, mencionado por Aragón, 1985; Laboratorio de Salinidad de E.U.A., 1993; Porta *et al.*, 1994; Katerji *et al.*, 1994; Srivastava y Kumar, 1995; Royo y Aragües, 1995; Reddy y Iyengar, 1998).

5. MANEJO DE SUELOS SALINOS

5.1. Problemática del manejo de los suelos salinos en G. Villaroel (D. Hervé, R. Ledezma)

En la llanura fluvio-lacustre se cultiva mayormente en seco, inspirándose de técnicas de aridocultura, con la finalidad de coleccionar y concentrar el agua de lluvia y luego los flujos de escurrimiento, para aumentar la cantidad de agua captada por la unidad de superficie aprovechada por la planta. Se aplica este principio en el cultivo manual, fabricando hoyos con una pequeña lampa; con tracción animal para realizar surcos, con arado de discos y tractor para abrir zanjias.

La roturación completa del terreno resulta imposible manualmente y es difícil con maquinaria en suelos de textura limosa a arcillosa con horizontes superiores compactados de densidades aparentes de 1.5 g/cc. El horizonte A es arcilloso y estructurado en agregados angulosos, y la proporción de arcilla mas limo muy elevada (cerca a 80%). Tomando en cuenta la inestabilidad estructural de los agregados, el tamaño de los terrones fabricados en la superficie del suelo trabajado debe ser suficiente para retrasar su incorporación en la costra.

En el terreno ya roturado se puede usar la yunta para sembrar. Jugando con la baja ocurrencia de las precipitaciones (250 mm de diciembre a abril), se debe fabricar en la siembra un estado del suelo favorable a la penetración radicular y a la extracción de nutrientes, que se mantenga favorable durante el tiempo de crecimiento de los cultivos. Hay que favorecer entonces un lavado localizado de las sales en la zona donde ocurrirá la germinación y luego el desarrollo radicular. El objetivo es de bajar la conductividad eléctrica a menos de 4 mS cm⁻¹. Tanto en seco como con riego, las técnicas de labranza y de siembra practicadas por los agricultores, tienden a concentrar el agua y lavar las sales (cuadro 5.1).

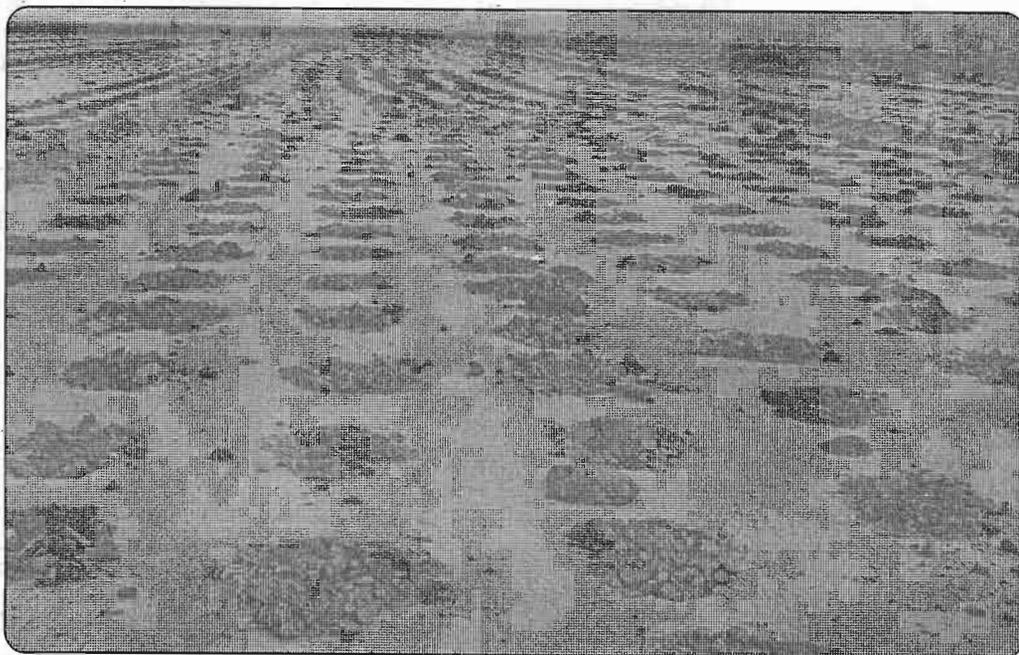
El riego actualmente beneficia sólo a una proporción reducida del área cultivada. Se busca con el riego adelantar el ciclo de cultivo, contrarrestar la escasez de agua durante los meses de agosto a noviembre y desplazar las sales acumuladas en la superficie del suelo durante la época seca, si es posible hacia el subsuelo, debajo de la zona colonizada por las raíces. Obviamente, la limitación

por las sales, levantada durante un ciclo de cultivo, se mantendría al siguiente año en ausencia de drenaje.

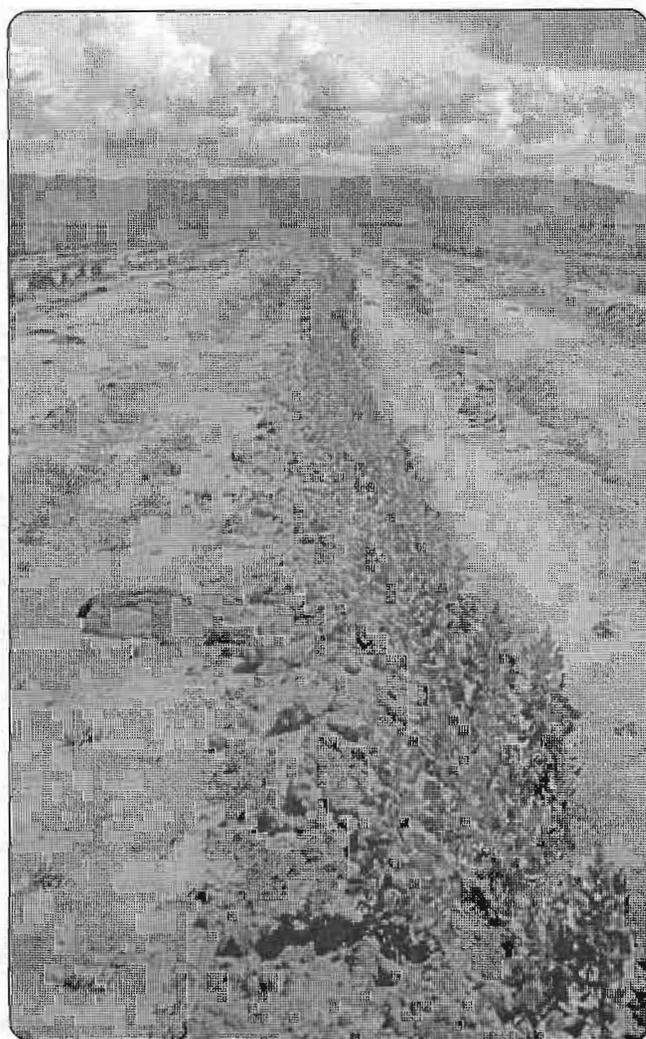
Cuadro 5.1. Técnicas de labranza y siembra en la provincia G. Villaroel

Labranza	Siembra	Riego/Secano	Cultivos
0	Manual en hoyos, con lampa	Secano	Quinua, cañihua
Discos	Surco, con yunta	Secano	Quinua después de papa, cebada
Discos (por fajas)	Zanjas, con disco	Secano	Quinua, cañihua, kauchi
Subsolador	Zanjas, con disco	Secano	Avena, quinua (exp.)
Discos (completo) En suelos no salinos	Tabla, con yunta	Secano (riego)	Alfalfa, cebada, papa quinua, cañihua
Discos	Siembra directa	Secano	Alfalfa, cebada
Discos	Con rastra	Secano	Alfalfa, cebada

Los cultivos de quinua, cañihua, se siembran manualmente en hoyos, en terrenos arcillosos con poca infiltración (Foto 5.1). Abriendo hoyos de 30 a 40 cm de diámetro por 10 a 15 cm de profundidad, se rompe localmente la costra superficial. Estos hoyos se encuentran separados con distancias de 40 a 50 cm, de manera a recuperar en cada hoyo el agua escurrida en su alrededor, lo que significa multiplicar por cinco la cantidad de agua disponible por las lluvias. Esta técnica permite desplazar los sales fuera de la zona radicular de cada planta.



Fotos 5.1. Siembra de quinua en hoyos.
Arriba: hoyos escarvados manualmente (Hervé)
Abajo: quinua sembrada en hoyos (Ledezma)



Fotos 5.2. Siembra en zanjas.

Izquierda: zanja escarvada con discos y tractor (Ledezma)

Derecha: zanjas sembradas con quinua (Hervé)

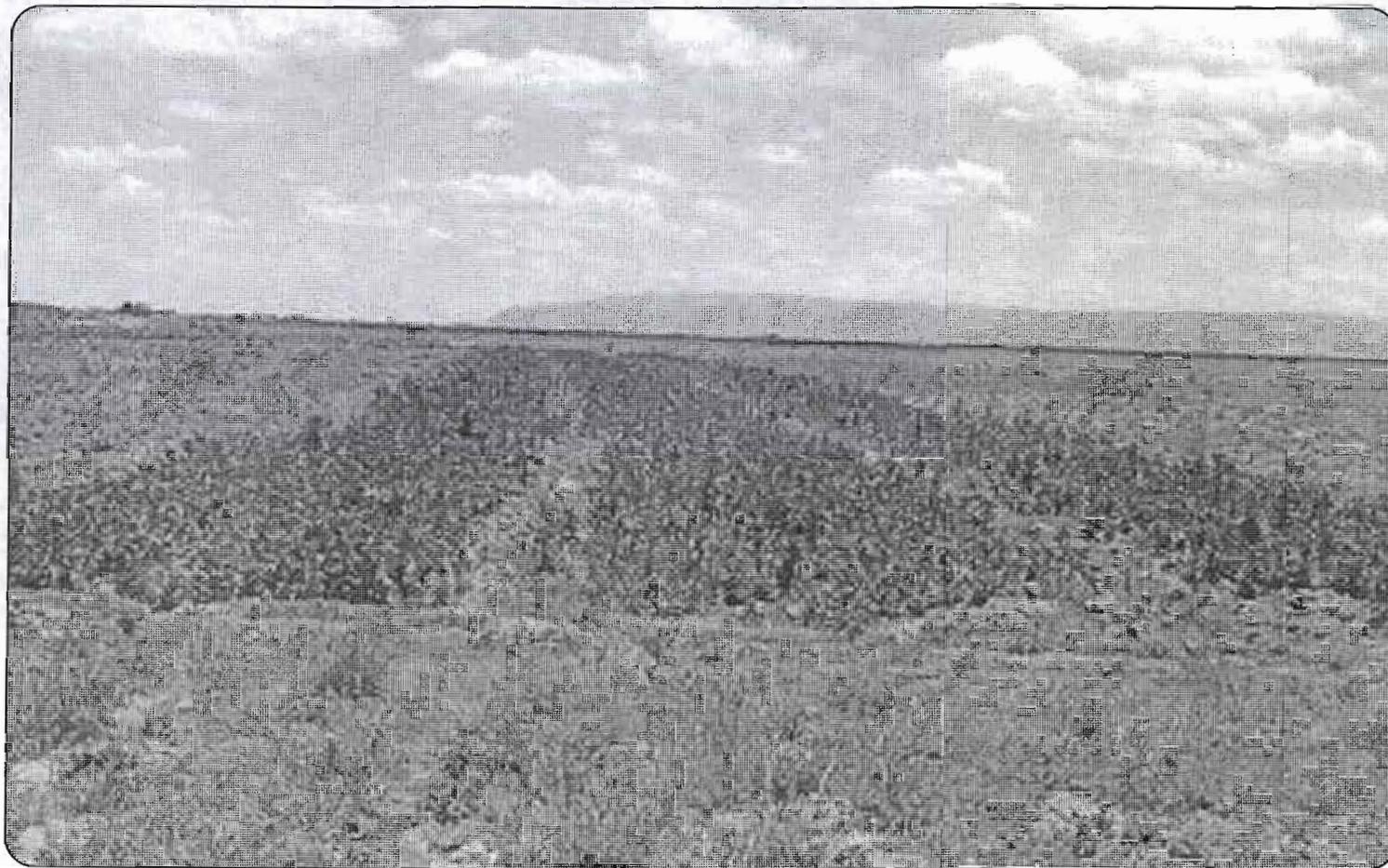


Foto 5.3. Siembra en tablonos.

El cultivo en zanjas aplica los mismos principios que el cultivo en hoyos, pero adaptados al uso de tractor, mediante una agricultura extensiva consumidora de espacio (Foto 5.2). Tomando en cuenta la compacidad y rigidez de la costra superficial, puede ser insuficiente una potencia de 50 HP para trabajar con arado de discos. Se requiere a menudo tractores de más de 70 HP de potencia. Los surcos (70 a 90 cm de ancho) son excavados con arado de discos, en líneas distanciadas de 3 a 10 metros. Para efectivizar el uso del suelo, nuevas zanjas pueden ser abiertas en los espacios inter-surcos del año anterior. Para el cultivo de quinua, las distancias son inferiores: 50 a 60 cm de ancho de zanjas distanciadas de 2 a 4 metros.

El agua de lluvia escurre en las superficies encostradas situadas entre dos líneas de siembra, que tienen una muy baja tasa de infiltración, y se estanca en los surcos abiertos con discos. Las plantas sembradas al pie de los camellones (1m a 2m de ancho) se benefician del lavado de sales y de una humedad del suelo debajo de los surcos. Su ubicación al pie de la pequeña pendiente que separa el surco del tope del camellón evita que se asfixien cuando el canal se ha llenado de agua. El ancho de la tabla de escurrimiento o la distancia entre surcos, incidirá en la concentración del agua hacia el surco, con el riesgo que se corte el borde del surco por la velocidad adquirida. Como consecuencia, micro desplazamientos de tierra pueden ir colmatando los surcos. Además, un efecto indirecto del escurrimiento entre los surcos es el transporte y la concentración de semillas de plantas nativas en las zanjas.

El cultivo en tablonces se utiliza para la producción de cebada con quinua o con haba (Foto 5.3). En este caso, la siembra puede adelantarse en función del cultivo a septiembre u octubre. Este sistema permite desplazar las sales lejos de las zonas radiculares en los bordes de los tablonces, dejando la parte central de la tabla con mayor acumulación de sales.

Esta descripción da cuenta de técnicas de cultivo bastante adaptadas al medio, pero puede ocurrir un proceso acumulativo. Se trata también de evitar la evolución de suelos salinos que tienen suficientes sales solubles hacia suelos alcalinos con una tasa elevada en sodium intercambiable. Estudiaremos entonces cómo aumentar el drenaje con el uso de un subsolador, y su efecto en la instalación y el desarrollo de los cultivos de quinua y cebada. La selección de las especies de la sucesión debe adaptarse a niveles crecientes de salinidad. Empezamos por

inventariar las especies halófitas que ya fueron comprobadas. Grandes extensiones de halófitas forrajeras han sido ya sembradas con éxito en la llanura fluvio-lacustre. Existen también perspectivas de desarrollar el cultivo de quinua en suelos salinos de la provincia G. Villaroel. Finalmente, varios estudios y propuestas se pueden confrontar para diseñar las condiciones de un uso racional de las aguas disponibles para el riego.

5.2. Efectos del subsolado sobre suelos salinos y cultivos de la sucesión (D. Hervé, D. Ramos, V. Mita)

5.2.1. Objetivo

Para mejorar el lavado de sales logrado con el cultivo en zanjas, se propuso comprobar con un diseño experimental el efecto adicional de un subsolado debajo de la misma zanja. La investigación se realizó en dos comunidades de la provincia Gualberto Villaroel, Laruta y San Miguel. En un diseño experimental de parcelas divididas con tres repeticiones, conducido en parcelas campesinas, se compara el uso de un arado de discos (3 cuerpos) con un subsolador (1 cuerpo, tractor 90 HP), durante dos campañas agrícolas (1994-1996), en suelos, salino y salino-sódico. Se evalúan los efectos del trabajo del suelo sobre la salinidad del suelo, midiendo la conductividad eléctrica y el pH, y sobre el rendimiento de especies cultivadas muy diferentes en cuanto a su sistema radicular: quinua con raíz pivotante y cebada o triticale, con raíz fasciculada.

5.2.2. Campaña 1994-95

Protocolo, clima y suelos

En 1994-95, se comparó dos parcelas, con suelo salino en Laruta 1 y con suelo salino-sódico en San Miguel (cuadro 5.2). La precipitación en Laruta entre el 12 de noviembre 94 y el 16 de abril 95 fue de 300.7 mm con una mayor concentración en enero (fig. 5.2.) El cultivo test fue la quinua.

Cuadro 5.2. Parcelas experimentales, campaña 1994-95

Suelo salino	Suelo salino-sódico
<p>Laruta 1 (muestra 12/94) pH agua ≤ 8.7 CE = 3.7 [2 -6] Na < 24% y cloruros muy bajos.</p> <p>Arcilla + limo fino entre 80% y 90%, con alrededor de 10% de arena fina; nivel limo-arenoso a partir de 1.20 m.</p>	<p>San Miguel (muestra 12/94) pH agua ≤ 8.7 CE = 5.8 [5 -6.5] Na > 24% y cloruros altos.</p> <p>Arcilla + limo fino superior a 90%; no hay arena</p>

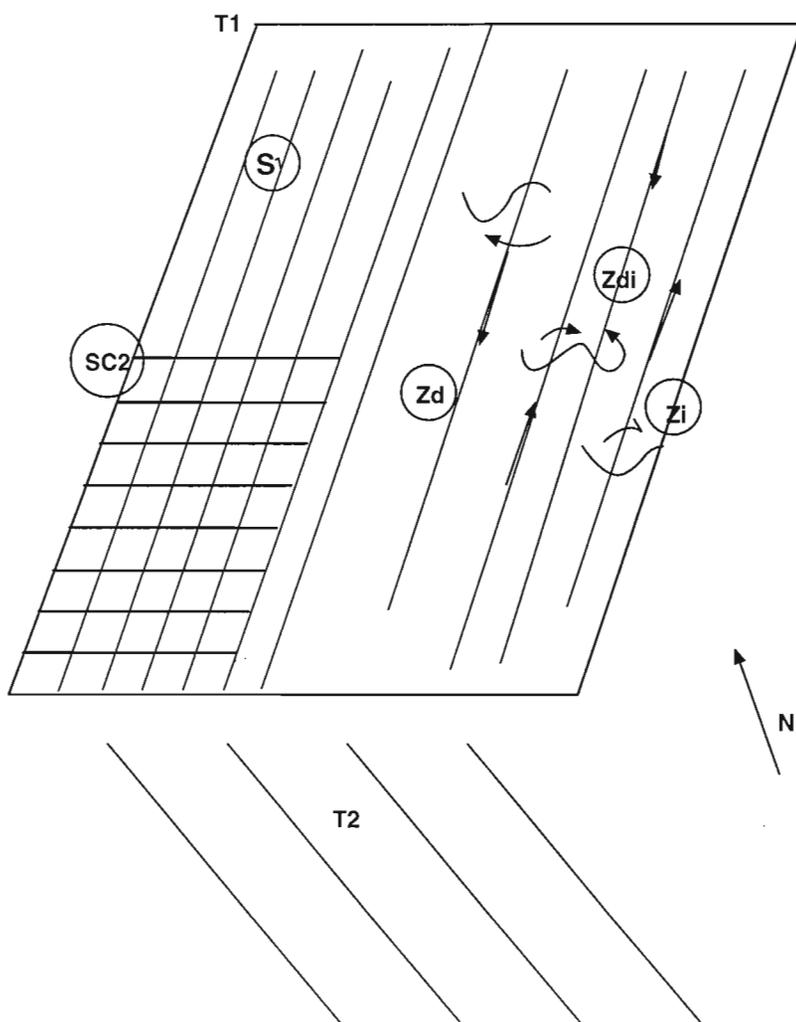
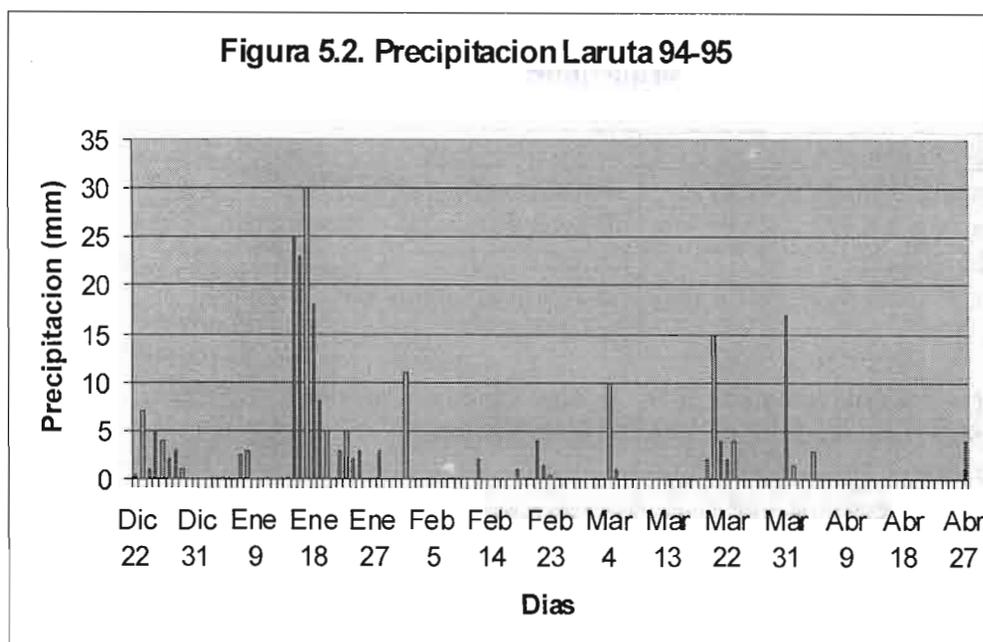


Figura 5.1. Parcela experimental Laruta 1, 1994-95

Figura 5.2. Precipitación Laruta 94-95



El objetivo era comparar el surcado con discos en zanja (una o dos zanjas para una línea de siembra) y el subsolado (uno o dos cortes perpendiculares con subsoladora) en dos situaciones, salina y salino - sódica. El arado de discos no es reversible; abre zanjas por los lados derecho e izquierdo, alternativamente, dejando una área de captación del agua entre camellón y surco de 1.5 m de ancho. El diseño experimental incluye 2 testigos, T1 sin roturar y T2 fabricando con discos zanjas separadas por más de cinco metros, y 5 tratamientos (Fig. 5.1): S1, una pasada del subsolado ; SC2, 2 pasadas cruzadas del subsolado ; Zd, surcado con discos lado derecho ; Zi, surcado con discos lado izquierdo ; Zdi, doble surcado con discos, ida y vuelta en líneas vecinas.

El suelo en Laruta 1 (cuadro 5.3) presenta un horizonte más limoso en 80-100 cm y un horizonte arenoso filtrante en 120-160 cm. Sus valores de pH, conductividad eléctrica y los cationes (Na, Cl y SO₄) son inferiores a los del suelo de San Miguel (cuadro 5.4) compuesto de arcilla limosa hasta 120 cm. El análisis del perfil cultural nos enseña que todos los horizontes son macizos, de textura arcillosa a arcillo-limosa, y con una estructura columnar o de bloques angulosos. En los primeros 10 a 20 cm, la densidad de raíces y estolones sub-horizontales de la vegetación nativa es alta. En todos los horizontes, la presencia de concreciones blancas y de manchas anaranjadas indica depósitos de yeso.

Prof. (cm)	Cond mS cm ⁻¹	pH Agua	Arena 0.05-2 mm	Limo 0.02-0.05 mm	Limo fino 0.002-0.02 mm	Arcilla < 0.002 mm	Cationes (meq.100 g ⁻¹)				Aniones (meq.100 g ⁻¹)		
							Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4
0-20	2.36	8.4	8.30	5.52	36.87	49.31	1.87	0.2	23.36	0.39	0.20	22.65	1.82
20-40	5.53	7.9	5.92	5.0	42.47	46.61	1.87	0.2	23.77	0.39	0.17	22.69	1.83
40-60	6.07	8.2	6.40	6.08	41.19	46.33	1.37	0.15	16.33	0.36	0.22	18.24	1.57
60-80			6.17	6.10	30.03	57.70							
80-100			1.33	3.48	68.28	26.91							
<120	3.17	8.7	14.81	18.83	47.95	18.41	1.76	0.11	11.26	0.26	0.13	11.27	2.04
<160	1.96	8.9	52.86	14.47	23.81	8.86	0.57	0.04	6.50	0.16	0.12	6.43	1.02
<180	2.97	8.6	26.12	12.25	37.52	24.11	2.03	0.12	10.20	0.29	0.10	9.99	2.23

Cuadro 5.4. Análisis de suelo salino-sódico, San Miguel (1994)

Prof. (cm)	Cond mS cm ⁻¹	PH Agua	Arena 0.05-2 mm	Limo 0.02-0.05 mm	Limo fino 0.002-0.02 mm	Arcil. < 0.002 mm	Cationes (meq.100 g ⁻¹)				Aniones (meq.100 g ⁻¹)		
							Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4
0-20	6.21	8.7	1.42	1.98	42.11	54.49	0.69	0.14	34.82	0.32	0.29	35.26	3.08
20-40	6.48	8.9	0.43	1.99	48.79	48.79	0.57	0.14	24.92	0.44	0.17	21.27	2.31
40-60	5.53	8.8	0.39	1.73	45.22	52.66	0.40	0.14	24.97	0.23	0.39	20.06	2.38
60-80	5.06	8.7	0.56	2.01	53.23	44.2	1.14	0.14	21.53	0.27	0.27	16.22	5.58
80-100	5.53	8.7	0.62	0.98	50.28	48.12	3.69	0.14	24.05	0.36	0.21	14.54	11.03
100-120	5.80	8.9	0.51	1.99	46.5	51.0	0.42	0.14	26.86	0.25	0.42	22.42	2.6

La mineralogía de las arcillas fue determinada en ambos sitios por análisis difractométrico en el laboratorio LFS del IRD (ex-ORSTOM) en Bondy, Francia (10/01/95). Son arcillas micáceas de tres capas con hojas de espesor constante, de tipo illita (dictaedrico de tipo muscovita), con un poco de mineral estratificado irregular de smectita – illita, un poco de chlorita, signos de kaolinita, hematita, un poco de quartz y solamente en San Miguel, un poco de calcita.

La estabilidad estructural, definida por el índice de inestabilidad $\log_{10} I_s$ y el índice de percolación $\log_{10} K$ (Henin *et al.*, 1972 ; Ramos & Hervé, 1996), mide la resistencia a la degradación del estado superficial del suelo. Es un indicador muy importante de tomar en cuenta para el manejo de suelos salinos.

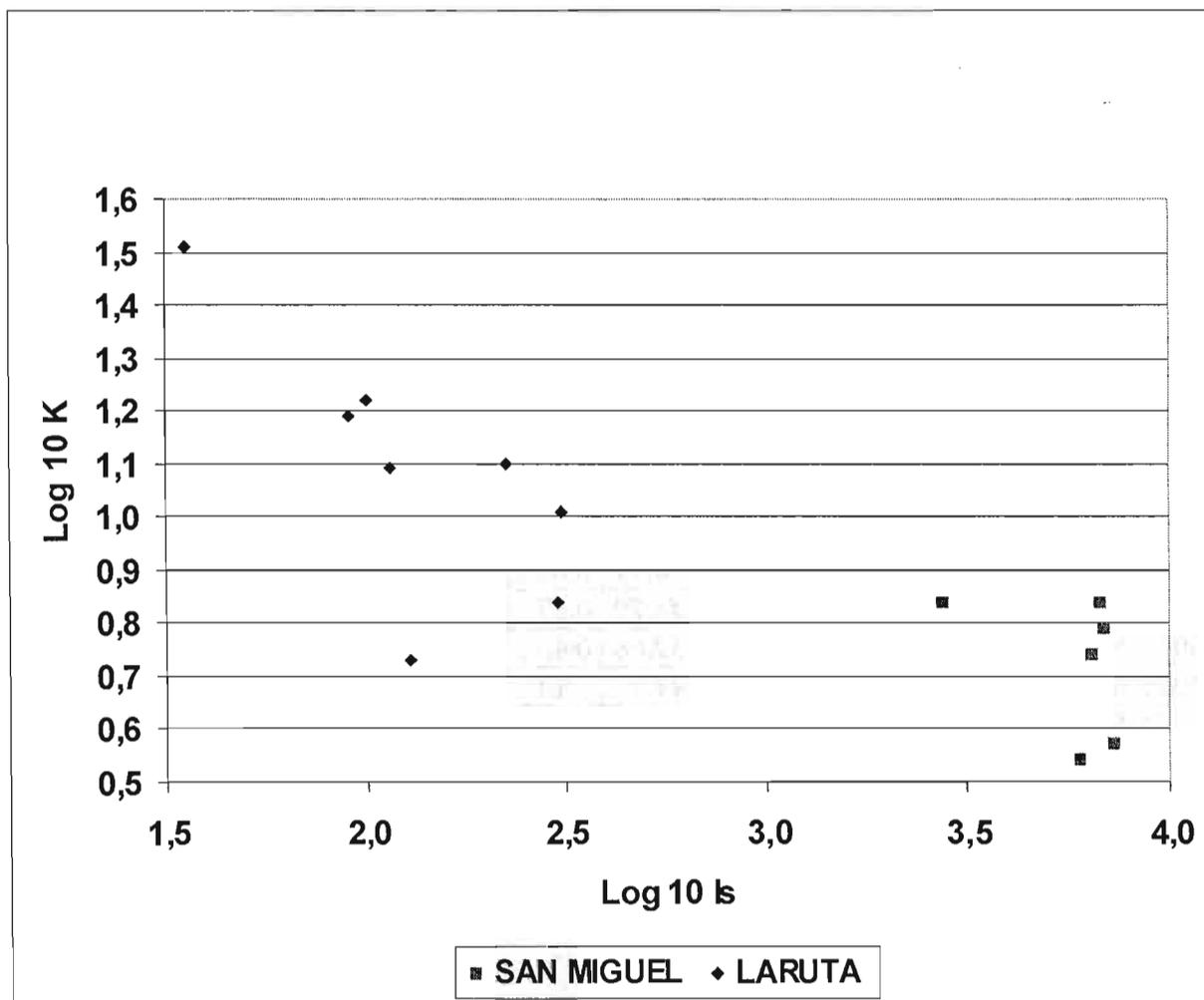


Figura 5.3. Estabilidad estructural de suelos de Laruta 1 y San Miguel

Resultados

Estabilidad estructural

Los suelos salinos de Gualberto Villaroel son menos estables y menos permeables que los suelos franco-arenosos del Altiplano central boliviano (Hervé & Ramos, 1995). Las muestras de San Miguel, salino - sódicas, se diferencian de las de Laruta 1, salinas, por su mayor inestabilidad estructural (Fig. 5.3). Como consecuencia de esta inestabilidad, los terrones fabricados por el

laboreo tienden a incorporarse a la costra, empezando por los de menor tamaño, lo que influye en el espesor de esta costra.

Los porcentajes de los agregados estables con agua, alcohol y benceno se presentan en la figura 5.4 para ambas parcelas, con otros códigos de los tratamientos cuya correspondencia se aclara en la continuación. En Laruta se comparan un testigo sin roturar (t1), un testigo D4 (equivalente a T2) surcado con discos de zanjas separadas de más de cinco metros, el tratamiento de subsolado R2 (equivalente a SC2) y el tratamiento de zanja izquierda RF6 (equivalente a Zi). En San Miguel se comparan el testigo sin roturar (SMt) con el tratamiento de subsolado (SMRC) y el tratamiento de zanja (SMRF).

Al hidratarse un terrón, el agua presiona el aire retenido en su porosidad, incrementando la presión interna hasta su ruptura. Cuanto más fuerte es la desagregación, menor es la cantidad de agregados estables que quedan. Cuando se usa alcohol, líquido miscible en agua y no polar, la rehumectación se hace sin aumento de la presión interna y resultan más agregados estables. El efecto inverso se espera del benceno, líquido incompresible, no miscible con agua, que aumenta al máximo la presión interna, salvo que este efecto sea contrarrestado por la presencia de materia orgánica hidrófoba. Se supone entonces un proceso de desagregación más intenso en benceno que en agua y más intenso en agua que en alcohol y, en consecuencia, una clasificación inversa para el porcentaje de agregados estables. En Laruta los agregados separados con alcohol se encuentran en mayor cantidad que los agregados separados con agua y ambos se encuentran en mayor cantidad en 3-6 cm que en la costra superficial. Por el contrario, los agregados separados con benceno son más numerosos en la superficie (0 – 3 cm), donde la densidad de raíces y rizomas es mayor que en el horizonte sub-superficial (3 – 6 cm). En San Miguel el suelo más sódico presenta tasas muy bajas de agregados estables y el nivel sub-superficial 3-6 cm es más inestable que la costra, por lo que presenta mayores riesgos de degradación.

Evolución de las características químicas durante el cultivo

El trabajo de subsolado corta la espesa costra superficial y levanta tablas cuya coherencia está reforzada por una red densa de estolones y raíces. En estas condiciones, las posibilidades de germinación se encuentran limitadas a los terrones situados debajo de estas tablas. El trabajo con discos escarva un surco y voltea la tierra de un lado. En el camellón así constituido, los terrones quedan por encima de la costra intacta que constituye un obstáculo para las raíces.

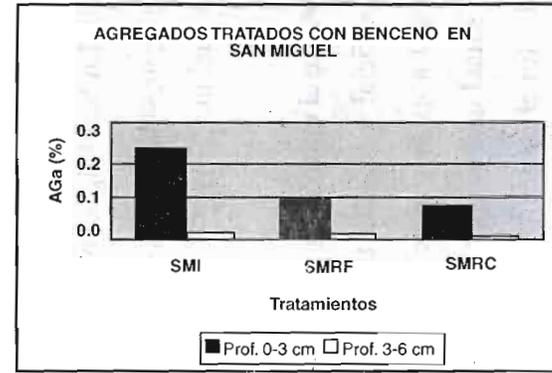
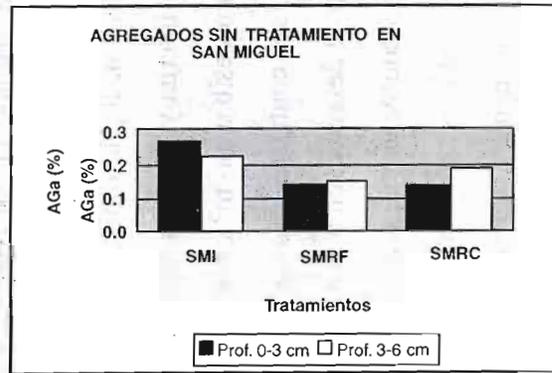
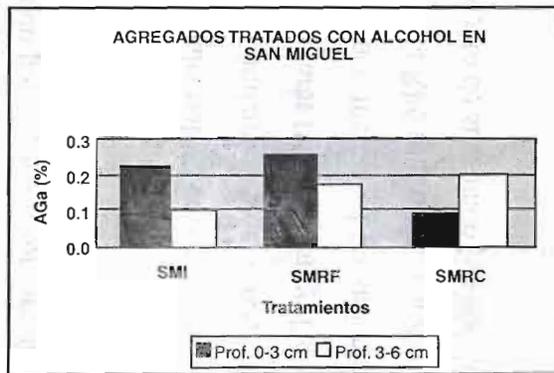
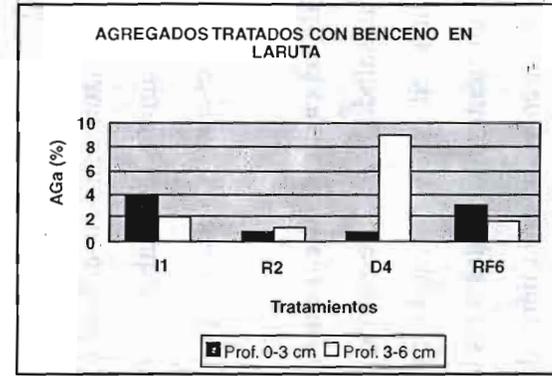


Figura 5.4. % de agregados estables en laruta 1 y San Miguel, 1994-95 (Ramos & Hervé, 2001)

En el testigo 1, no roturado, la conductividad no varía y el pH decrece de hasta una unidad en el horizonte superficial y a la profundidad de 40 - 50 cm. En el testigo 2, zanjas con discos espaciadas de varios metros, la conductividad baja mucho en los terrones y sube mucho en los surcos, traduciendo el efecto de concentración de la salinidad en los surcos. La humedad fluctúa, sin aumentar, entre 20 y 60 cm. El pH baja en todos los horizontes de 0.5 a 1 unidad.

Con un trabajo de subsolado, se obtiene un decrecimiento de la conductividad en todos los horizontes salvo en la superficie donde está aumentando, con valores máximos que son el doble del valor de los horizontes. La humedad en el suelo aumenta en el tiempo hasta 40 cm de profundidad y es estable a mayor profundidad. Paralelamente, el pH disminuye de 0.5 unidad en el horizonte superficial hasta 2 unidades en los otros horizontes. Se constata la misma evolución de la humedad, la conductividad y el pH en el tratamiento de líneas cruzadas de subsolado. No se mejora entonces las características del perfil duplicando las pasadas con subsoladora. Además, este tratamiento resulta bastante costoso.

En los tratamientos de surcado con zanjas, distinguimos el surcado derecha Zd del surcado izquierda Zi. En el primer caso, la humedad en el perfil va aumentando en la segunda o tercera fecha de muestreo y queda luego estable. La conductividad queda muy baja, salvo en la superficie al final. El pH es fluctuante; no baja, salvo en la superficie. En el segundo tratamiento Zi, la humedad del suelo se mantiene alta desde la primera fecha, salvo en la superficie. La conductividad es casi nula desde la tercera fecha de muestreo y, a la vez, muy alta en la superficie del suelo. El pH baja solamente en la superficie de 1.5 unidades. Globalmente, el tratamiento Zi aparece más favorable que el tratamiento Zd.

Creando dos surcos con discos, se pensaba reunir el agua de escurrimiento de ambos lados. No observamos un mejoramiento significativo. La conductividad baja solamente en las últimas fechas de muestreo mientras crece hasta el final en la superficie del suelo. La humedad en el perfil es inferior a la de los dos tratamientos anteriores. El pH disminuye solamente media unidad en la superficie.

Las curvas de evolución de las variables nos demuestran que el tratamiento con una pasada de subsoladora supera el tratamiento de surcado con zanja, porque disminuye la conductividad eléctrica; pero no resulta favorable a la emergencia y desarrollo de los cultivos. Es la razón por la cual se programó una segunda campaña para experimentar una combinación subsolado con surcado.

5.2.3. Campaña 95-96

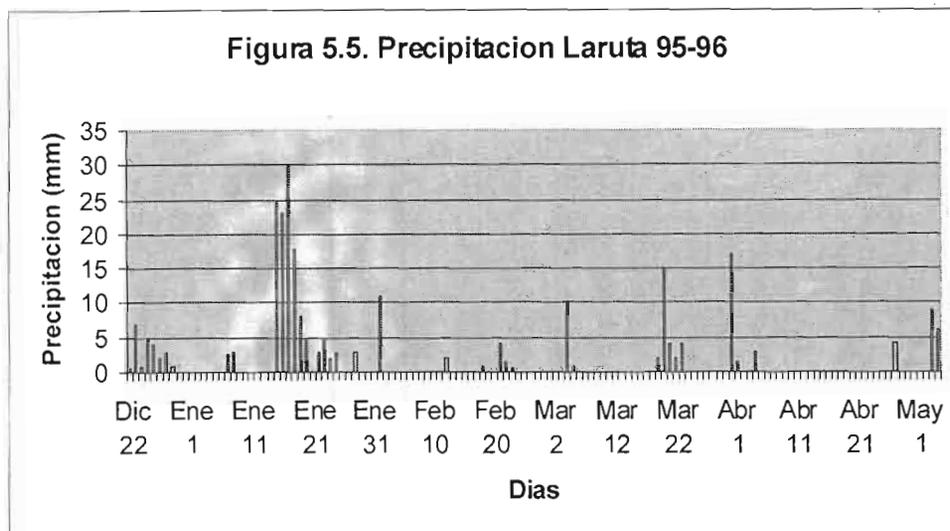
Protocolo, clima y suelos

En 1995-96, se estudió dos parcelas en Laruta:

- Laruta 2 tiene una conductividad de 4.2 (1.4 a 11.7 mS cm⁻¹) en febrero 1996; esta colonizada por *Distichlis humilis* (Ch'iji) y *Mulhenbergia fastigiata*, especies indicadoras de suelos salinos.
- Laruta 3 tiene una conductividad de 4.6 (1.5 a 15.7 mS cm⁻¹) en diciembre 1995, con una escasa cobertura vegetal de k'hota (*Antrobrium triandrum*), característica de suelos salino-sódicos. Pero se considera a Laruta 3 como salino, por sus características químicas.

Las precipitaciones entre el 22 de diciembre 1995 y el 4 de mayo de 1996 fueron de 252.5 mm en San José Alto (promedio 1960-1990 menos 11%, figura 5.5). El objetivo era comparar el surcado con discos (derecho o izquierdo) sólo y después de un subsolado. El diseño experimental es de parcelas divididas con 3 repeticiones y 4 tratamientos: zd zanja derecha, zi zanja izquierda, szd subsolado zanja derecha, szi subsolado zanja izquierda (Fig. 5.6). Se indica la orientación hacia el Norte de las dos parcelas de Laruta 2 y Laruta 3.

Figura 5.5. Precipitación Laruta 95-96



El suelo fue roturado el 20/12/95 y sembrado el 21/12/95 con quinua (Sajama, 15 kg/ha), cebada criolla (100 kg/ha) y triticale (Renacer, 126 kg/ha). Con el objetivo de controlar el lavado de sales en diferentes profundidades, se determinó la textura del suelo, la calidad de las arcillas y la estabilidad estructural en una sola fecha (1/05/96), la conductividad eléctrica (mS) y el pH en 3 fechas para Laruta 2 (22/12/95, 18/02/96, 21/05/96) y en 5 fechas para Laruta 3 (12/12/95, 17/02/96, 1/04/96, 21/05/96, 2/07/96), de manera a incluir el ciclo de cultivo, y en 5 profundidades: superficie, 0-10 cm, 10-20, 20-50 y más de 50 cm, de manera a evaluar el efecto del laboreo. Después de 120 días de haber realizado el laboreo, se observó el perfil cultural en una calicata en cada uno de los dos tratamientos, zanja y zanja-subsolado. Considerando las limitaciones para un acceso frecuente a las parcelas experimentales, se evaluó solamente la altura de plantas a los 102 días y las biomásas verdes y secas en la cosecha a los 135 días, cuando la quinua estaba en estado fisiológico de grano leche, la cebada y el triticale en estados de grano masoso. Se adelantó la cosecha antes de las heladas más fuertes, para poder evaluar la biomasa verde producida.

I				II				III			
zd	szi	zi	szd	zd	szi	szd	zi	zd	szi	szd	zi
		Q				Q				Q	
		C				C				C	
		T				T				T	

I				II				III			
zd	szi	zi	szd	zd	szi	szd	zi	zd	szi	szd	zi
		Q				Q				Q	
		C				C				C	
		T				T				T	

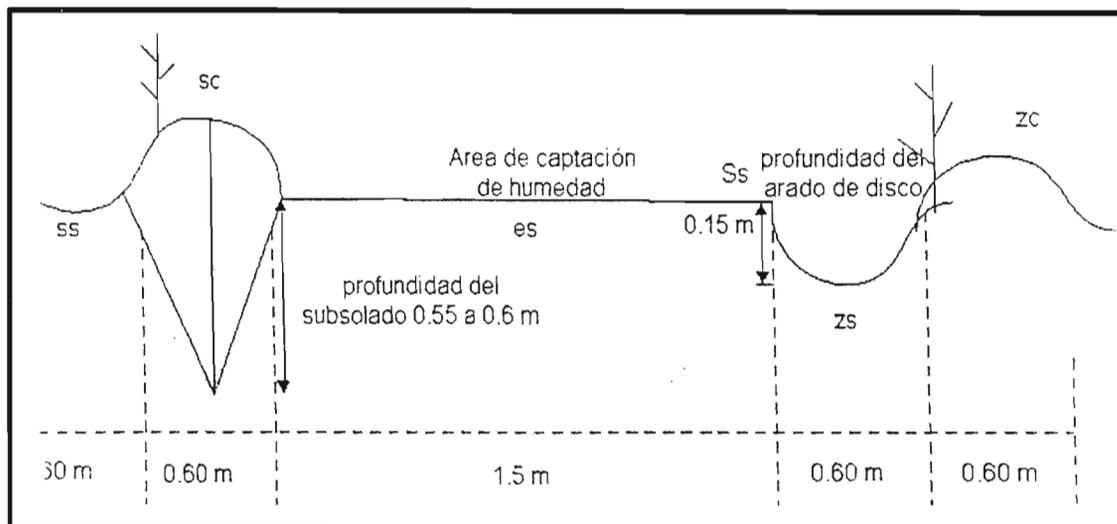
Figura 5.6. Diseño experimental , Laruta 2 y 3 (1995-96) (Hervé *et al.* 2001)

Resultados

Resultado del laboreo

En este segundo año, se determinó más precisamente la estabilidad estructural en las diferentes posiciones microtopográficas que resultan del laboreo del suelo (Fig. 5.7). Se distingue entre camellón y surco un área de costra sedimentaria no removida (es) que constituye una tabla de escurrimiento hacia el surco. Las posiciones en surcos, resultado del surcado en zanja (zs) o del subsolado (ss), ambos son muy inestables. Los sitios entre surcos (se) son ligeramente más estables que las situaciones sobre surcos pero tienen una tasa de infiltración similar. Las situaciones en camellones (sc y zc) son las más estables y permeables, cualquiera sea el tratamiento. Es justamente en el límite entre camellones y surcos que se colocan las semillas.

El resultado del laboreo en el perfil del suelo se puede apreciar en la figura 5.8. El trabajo con subsolado alcanzó 50-55 cm de profundidad y con discos, 15 cm de profundidad. Debajo de los terrones que resultan del trabajo con discos, las raíces no logran traspasar la costra no removida al lado del surco (Fig. 5.8a). Por el contrario, cuando esta capa compacta es rota por el subsolado, las raíces más profundas de la quinua logran penetrar el horizonte arcilloso en el lugar removido por el subsolado donde se encuentra mayor humedad (Fig. 5.8b).



sc = subsolado camellón zs - zanja surco
 ss = subsolado surco Ss = sobre surco
 zc = zanja camellón es = entre surco

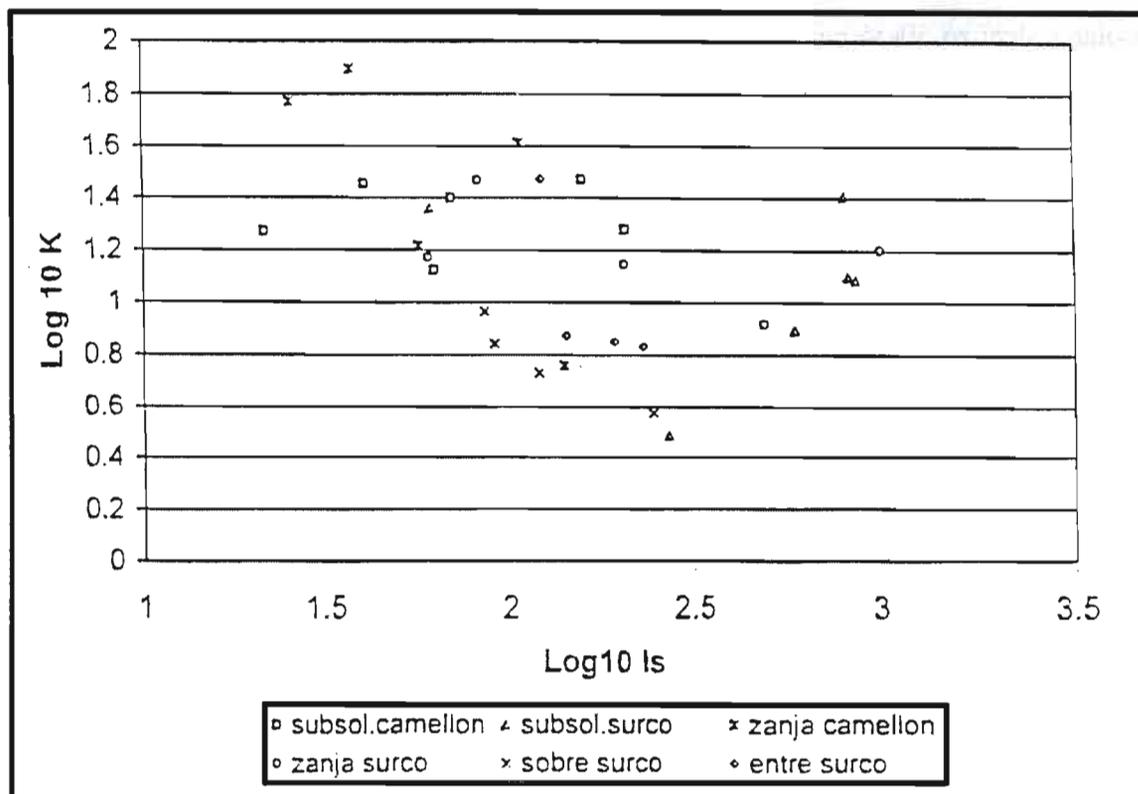
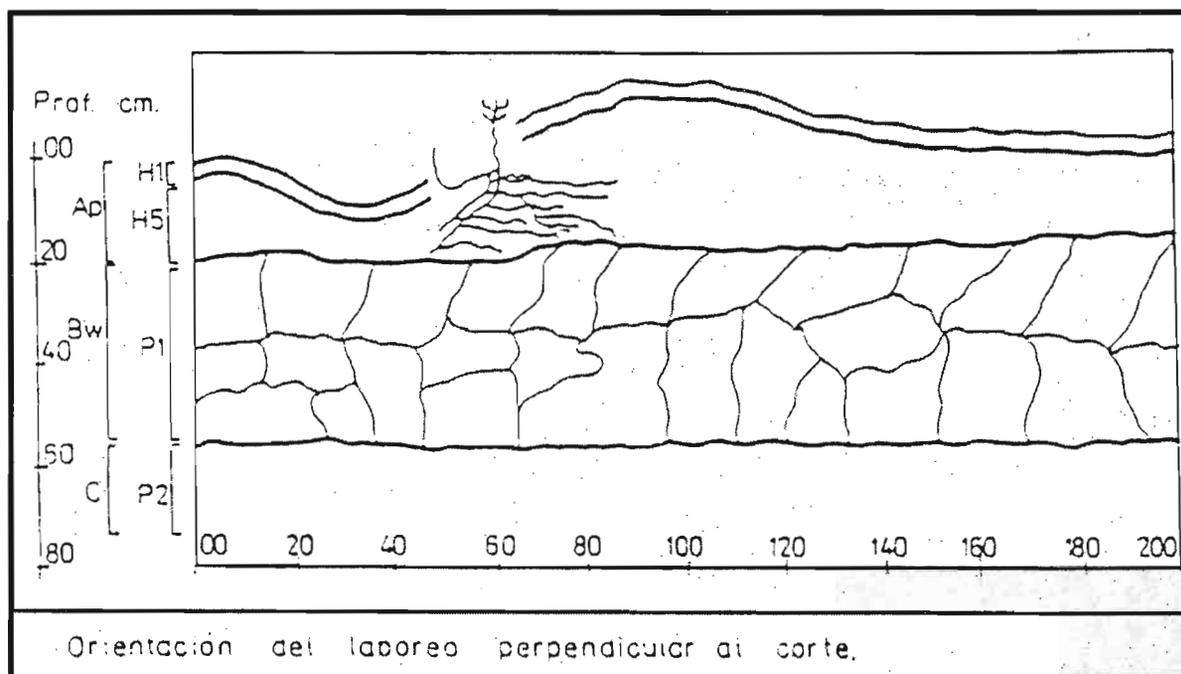


Figura 5.7. Estabilidad estructural segun la microtopografía que resulta del laboreo (Laruta 2 y 3)

a. Trabajo con arado de discos



b. Trabajo con subsolador y arado de discos

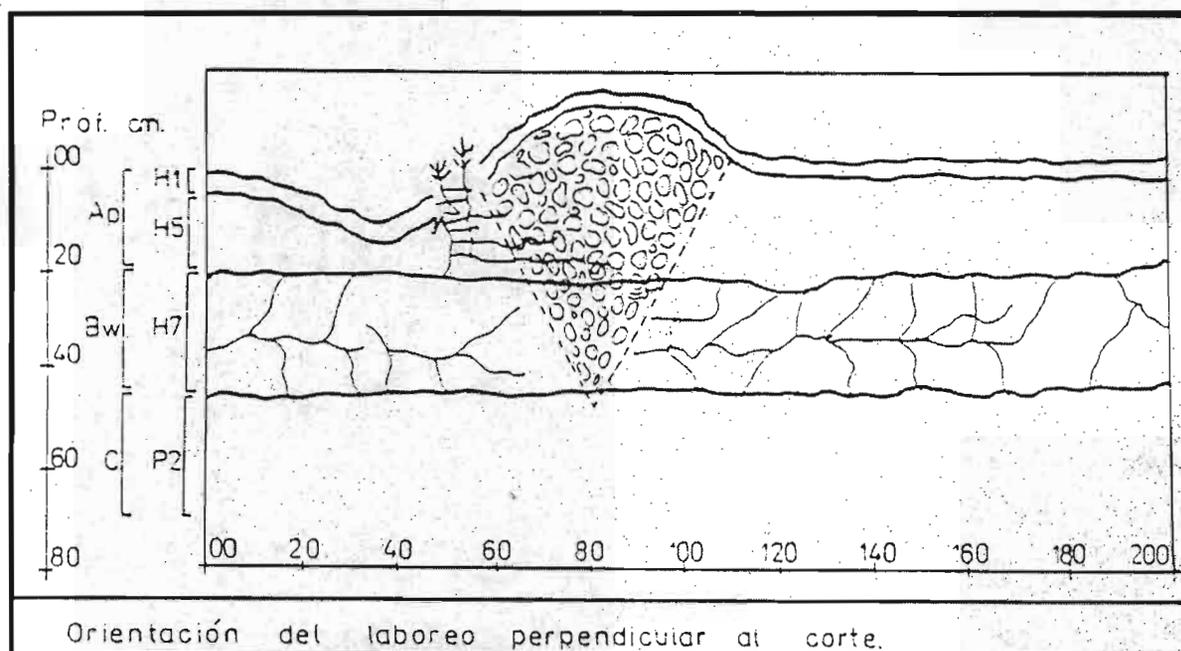
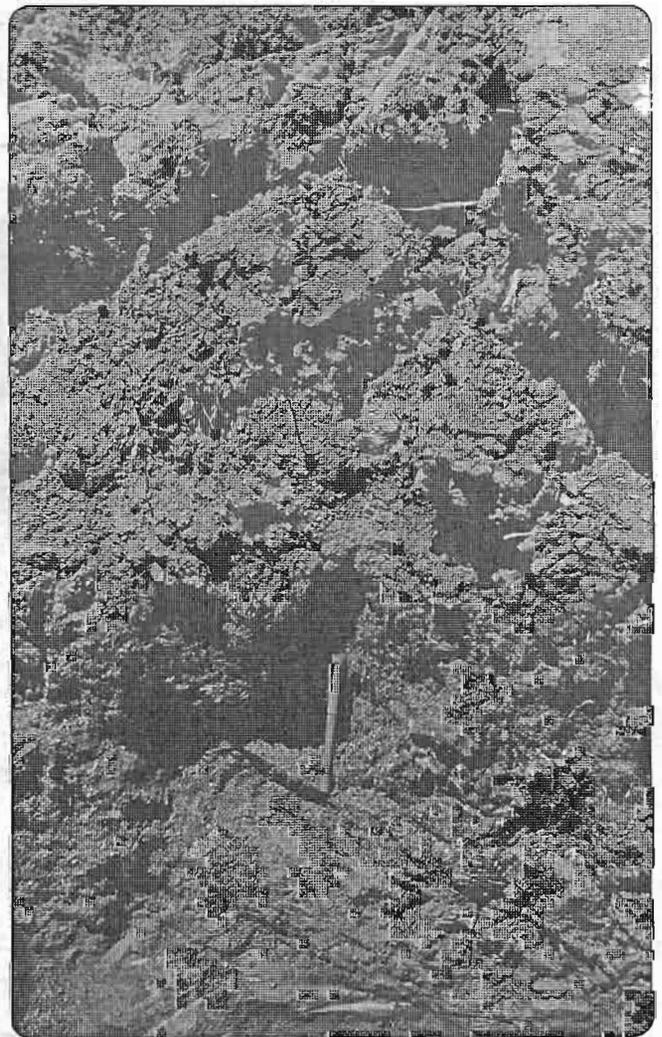


Figura 5.8. Resultado del laboreo para el sistema radicular de la quinua, Laruta 2 (Hervé *et al.* 2001)



Fotos 5.4. Trabajo del suelo (Hervé)
Izquierda: obstáculos para la raíz de quinua.
Derecha: profundidad del subsolado.

Evolución de las características químicas durante el cultivo

En Laruta 2

En la parcela Laruta 2, se dispone de observaciones solamente en tres fechas, en la siembra, durante el cultivo y en la cosecha. Se observa en la figura 5.9 que la conductividad eléctrica queda en el intervalo comprendido entre 4 y 7 mS cm^{-1} . En ambos casos, la conductividad queda cerca a 4 mS cm^{-1} , a partir de 50 cm de profundidad durante la fase de desarrollo del cultivo, sin diferencia entre tratamientos. Al final, la conductividad esta 1 mS cm^{-1} más bajo a 50 cm para el tratamiento con subsolado. Las variaciones del pH, mucho más reducidas, no diferencian los tratamientos (Figura 5.12). Al final del cultivo, con subsolado, el pH tiene una media unidad menos a 20 cm y una unidad menos a 50 cm, correspondiente a la profundidad del subsolado. El lavado del sodium hasta más de 50 cm de profundidad se observa en la figura 5.13, para ambos tratamientos, lo que permite el desarrollo radicular hasta esta profundidad. El efecto del subsolado se traduce en una disminución drástica del sodium en todo el perfil y un aumento a 80 cm. Después del cultivo, este efecto no se mantiene y en ambos tratamientos el contenido en sodium en 50-80 cm es más alto que antes del cultivo.

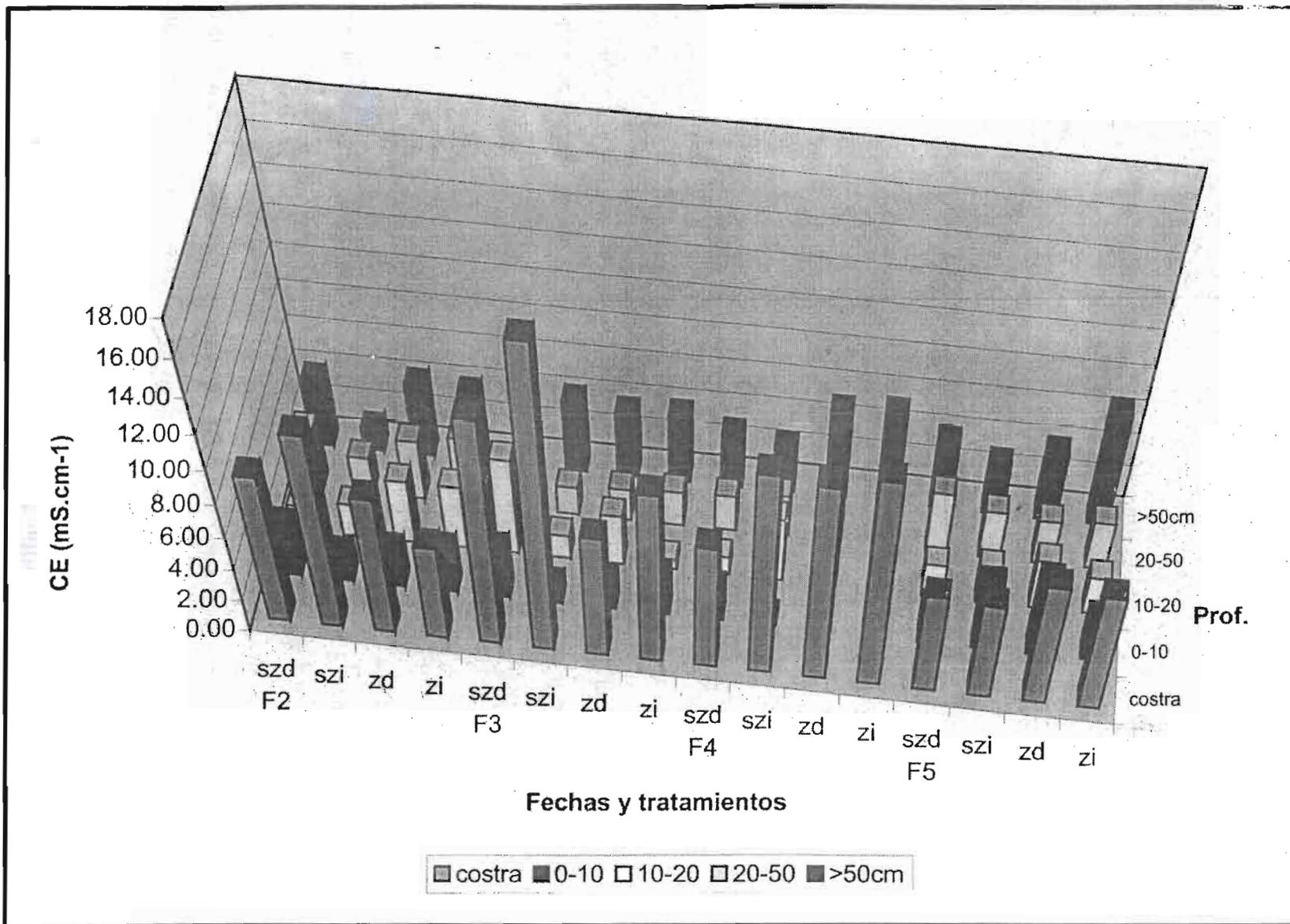


Figura 5.9. Evolución de la conductividad eléctrica a diferentes profundidades, Laruta 2

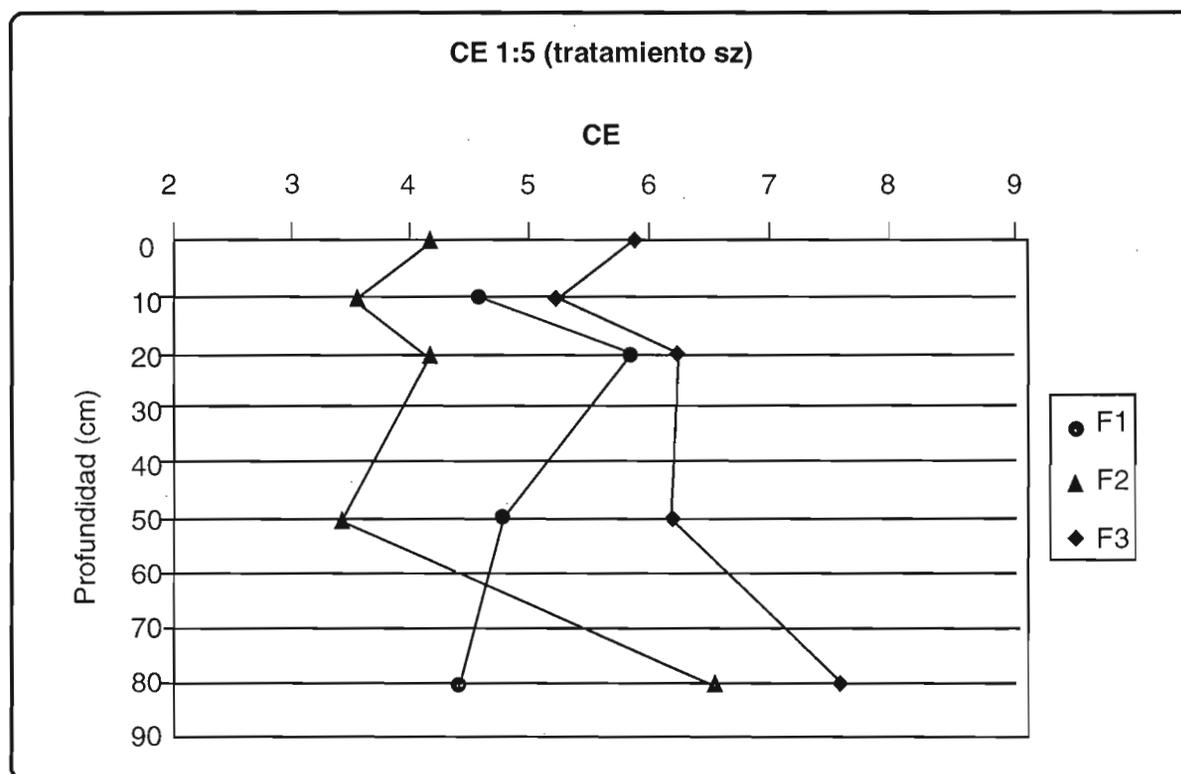
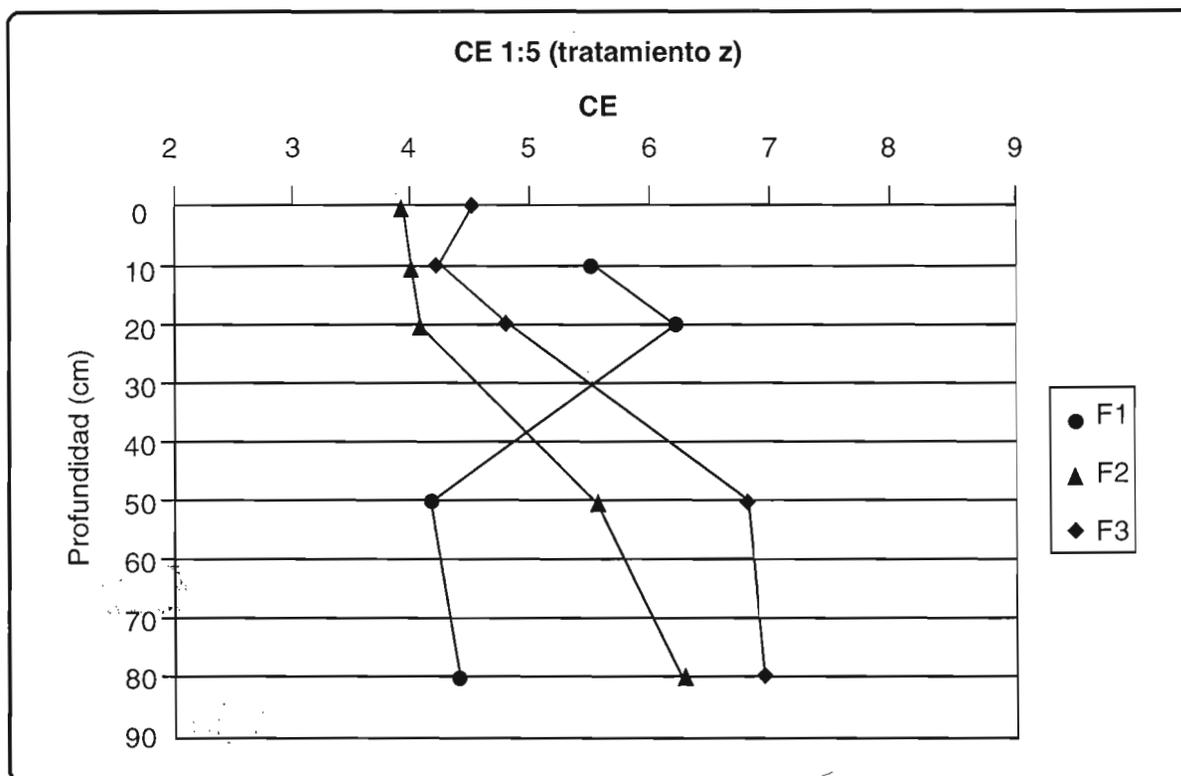


Figura 5.10. Evolución de la conductividad eléctrica en los tratamientos zanja y subsolado-zanja, Laruta 2

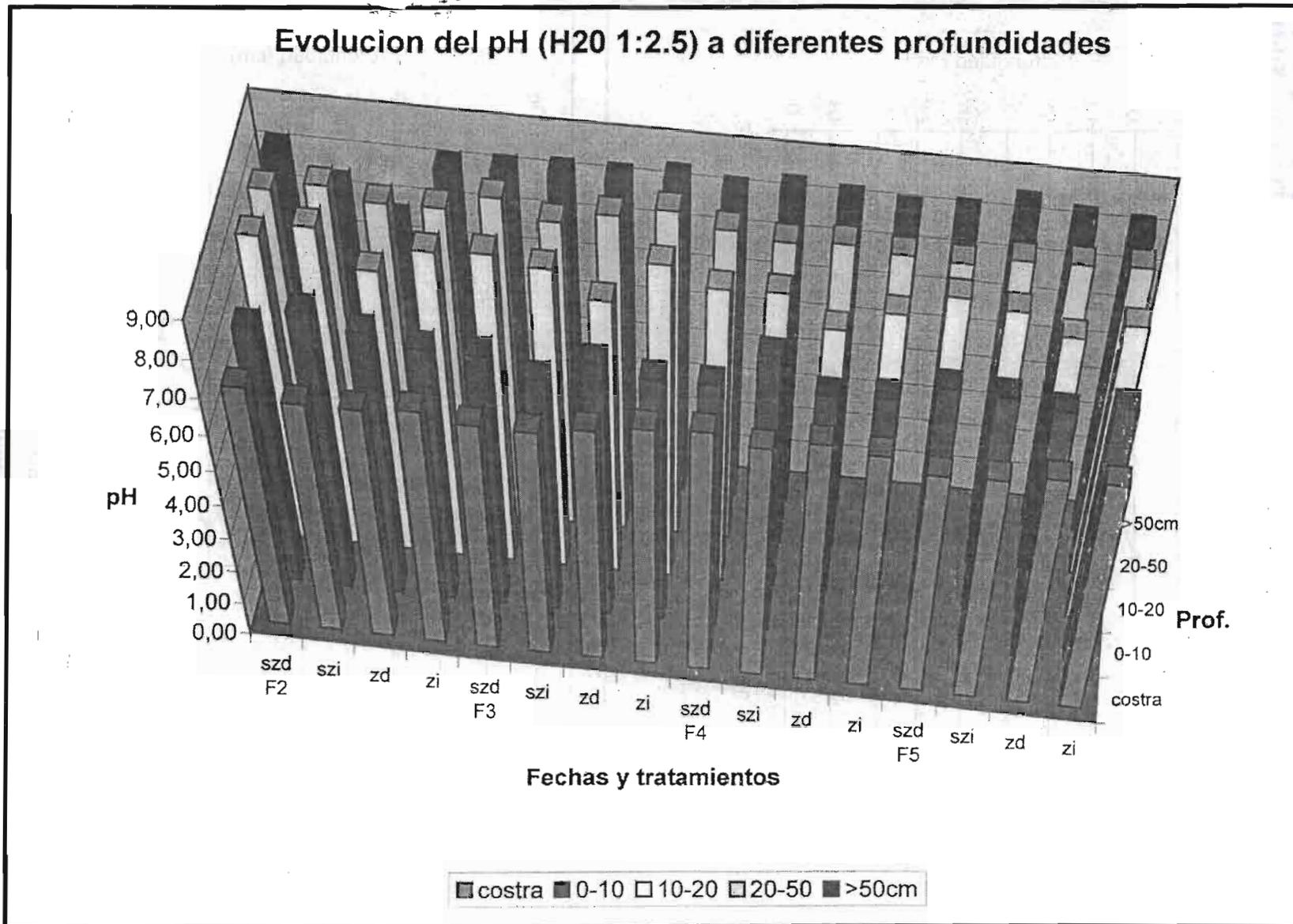


Figura 5.11. Evolución del pH (H2O 1:2.5) a diferentes profundidades, Laruta 2

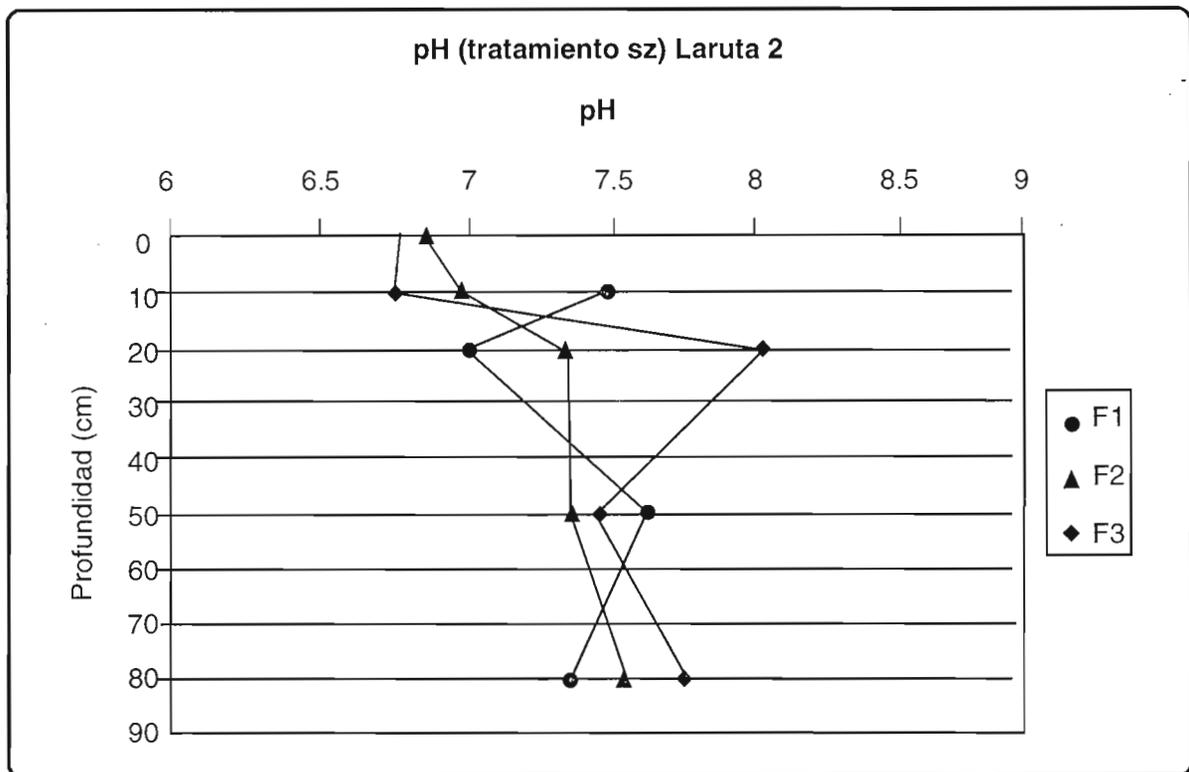
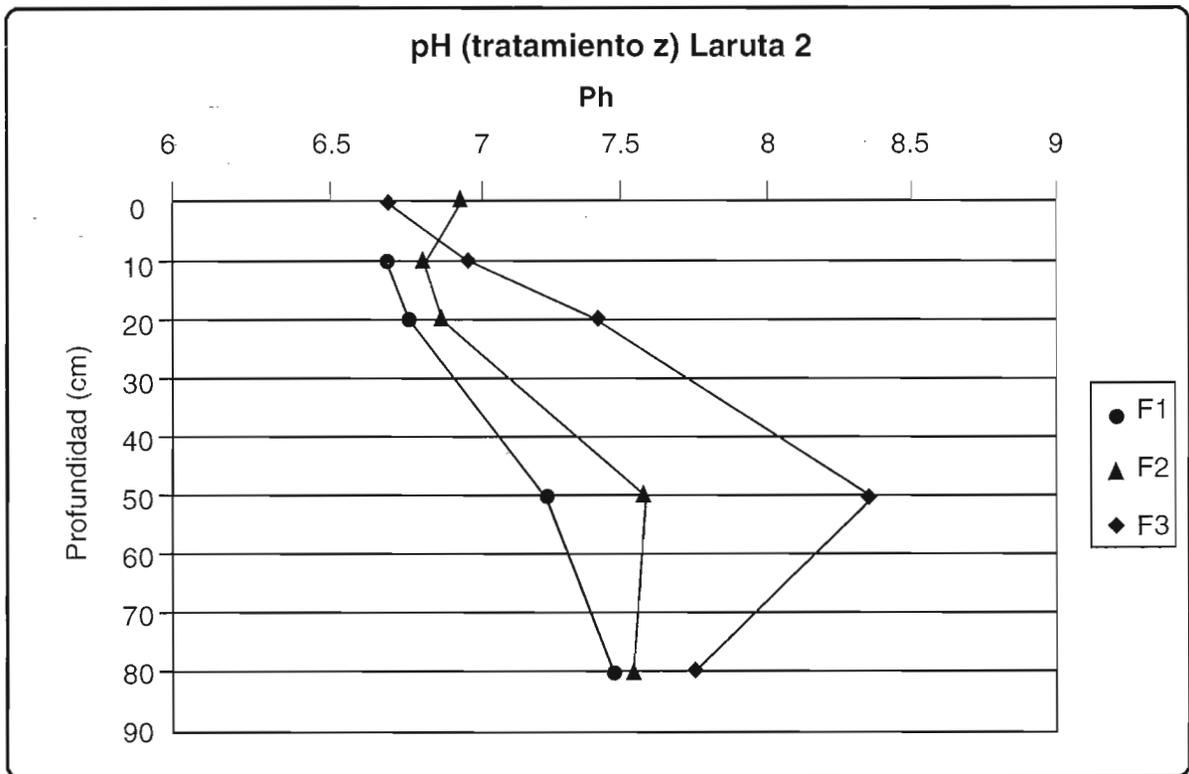


Figura 5.12. Evolución del Ph (H2O 1:2,5) en los tratamientos zanja y subsolado-zanja (Laruta 2)

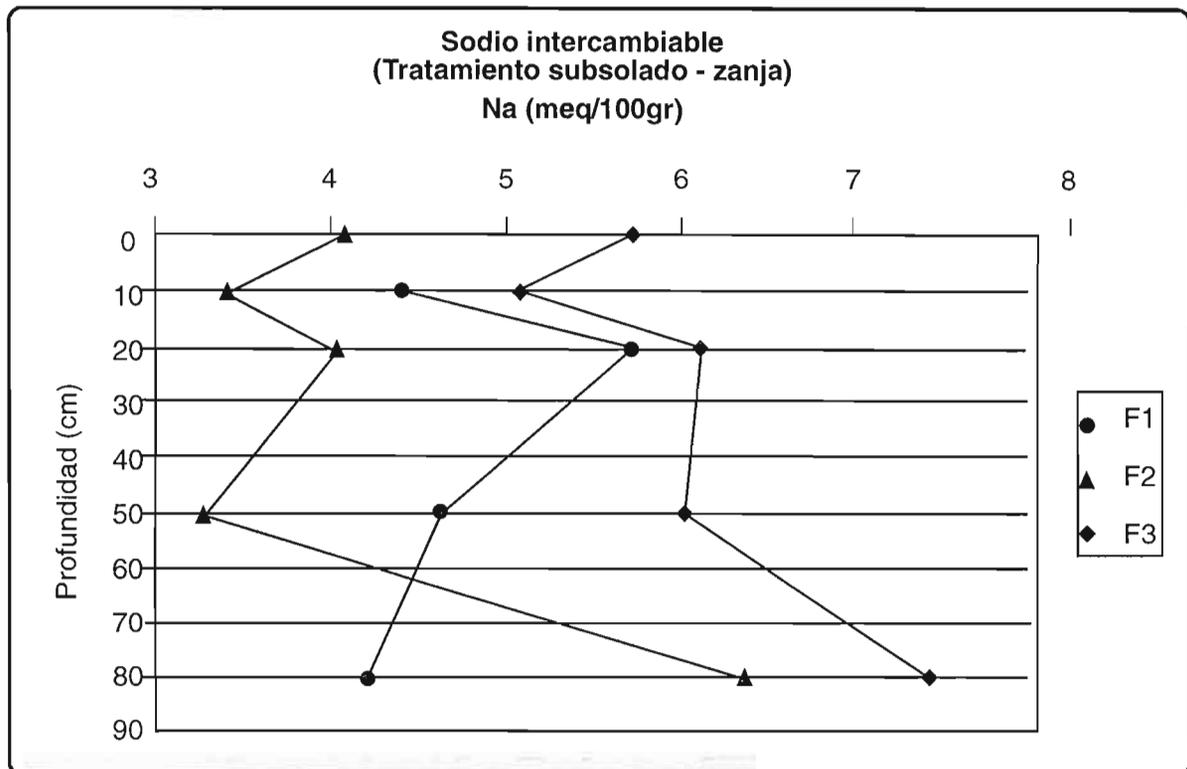
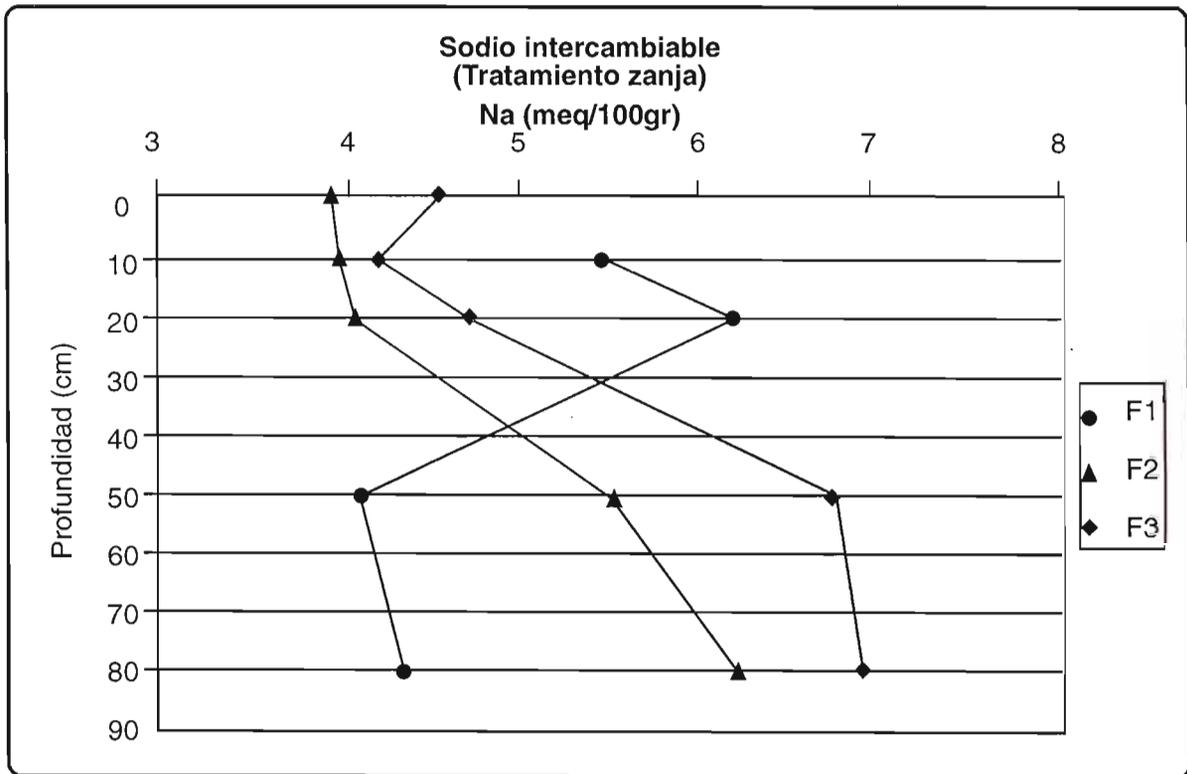


Figura 5.13. Evolución del sodio intercambiable en los tratamientos zanja y subsolado-zanja (Laruta 2)

En Laruta 3

Se presenta para la parcela Laruta 3 la evolución de la conductividad eléctrica y del pH en función de las fechas de muestreo y de los tratamientos. La fecha 1 indica el estado inicial, las fechas 2 y 3, el ciclo de cultivo, las fechas 4 y sobre todo 5, el inicio de la desecación del perfil después del cultivo. La conductividad, muy elevada en la costra y en 0-10 cm en la fecha 1, baja entre 2 y 4 mS cm^{-1} desde la fecha 2 (Fig. 5.14). Se mantiene baja con fluctuaciones en los horizontes 10-20 y 20-50, y entre 2 y 8 mS cm^{-1} a más de 50 cm de profundidad. En la costra superficial, se encuentra, en julio, una conductividad más elevada que en diciembre, antes del laboreo.

La figura 5.15 presenta la evolución del pH. El suelo subsolado tiene un pH inferior de hasta media unidad al surcado, en la primera fecha, desde la superficie hasta 20 cm. Esta relación se invierte desde la segunda fecha para luego estabilizarse. En la superficie, desde la tercera fecha, el pH no presenta variaciones según los tratamientos ; en 0-10 cm, fluctúa debajo de 7, en 10-20 cm fluctúa entre 7 y 8, entre 20 cm y más de 50 cm de profundidad, fluctúa entre 8 y 9. No se observa diferencias significativas ni estables entre los tratamientos.

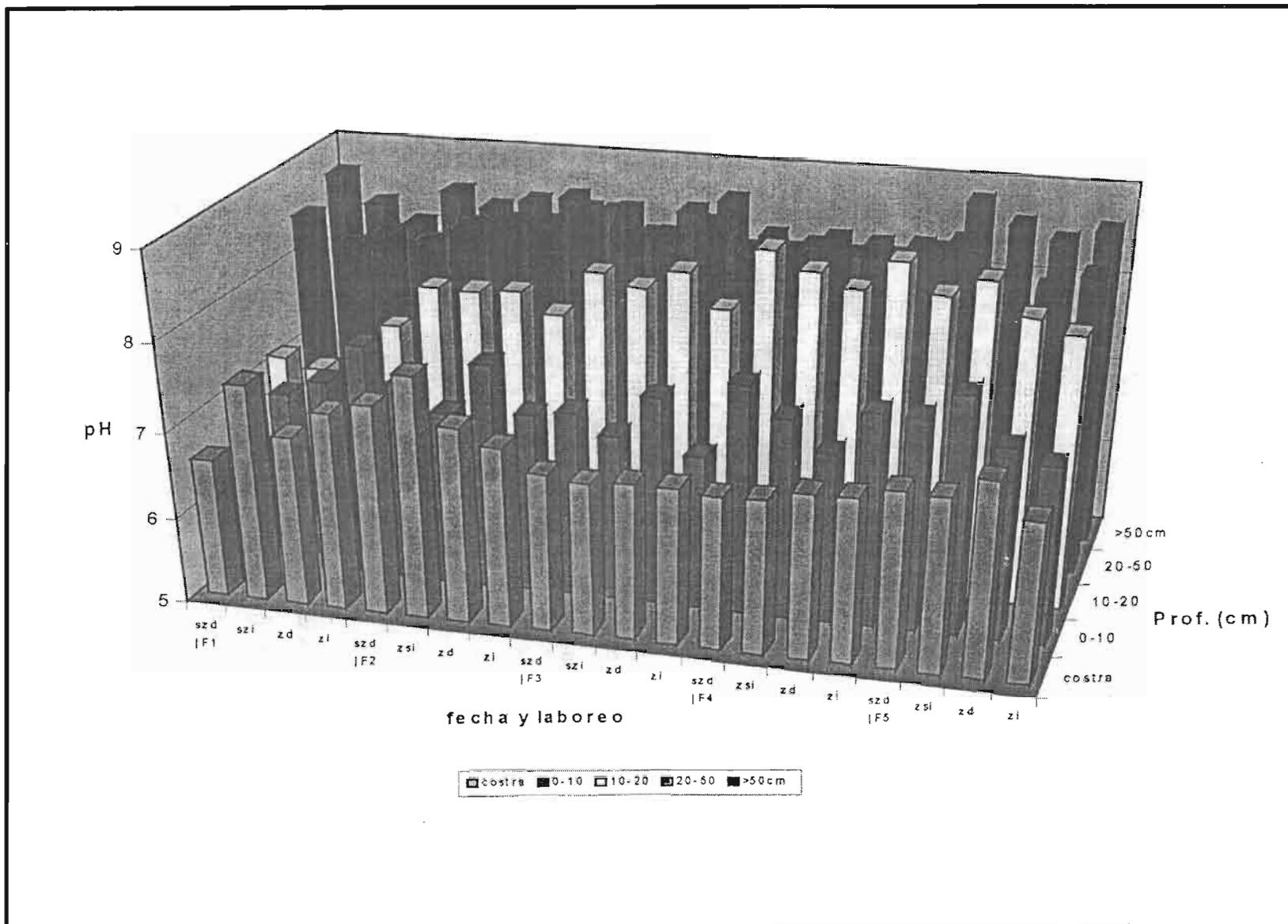


Figura 5.14. Evolución de la conductividad eléctrica a diferentes profundidades, Laruta 3 (Hervé et al., 2001)

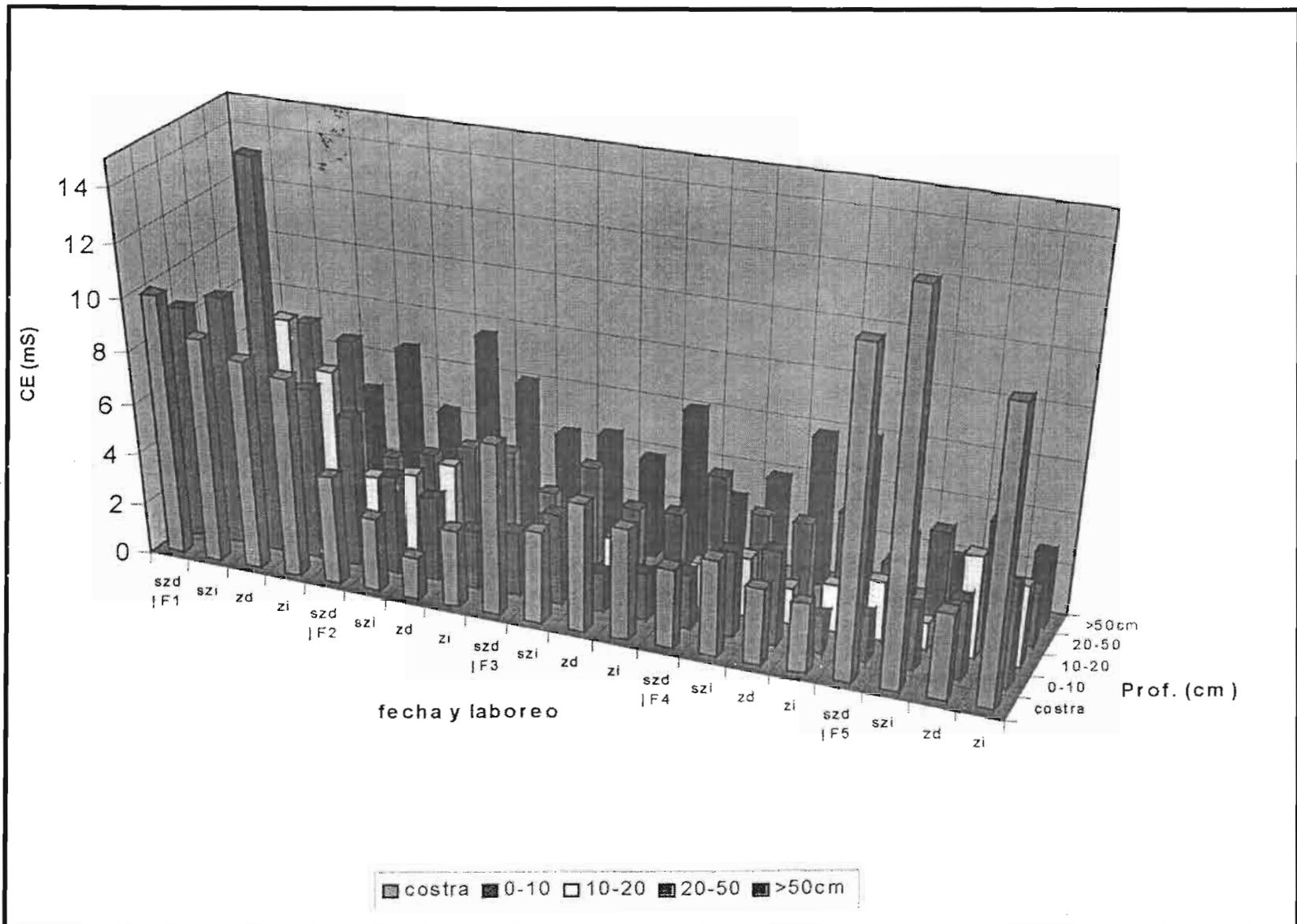
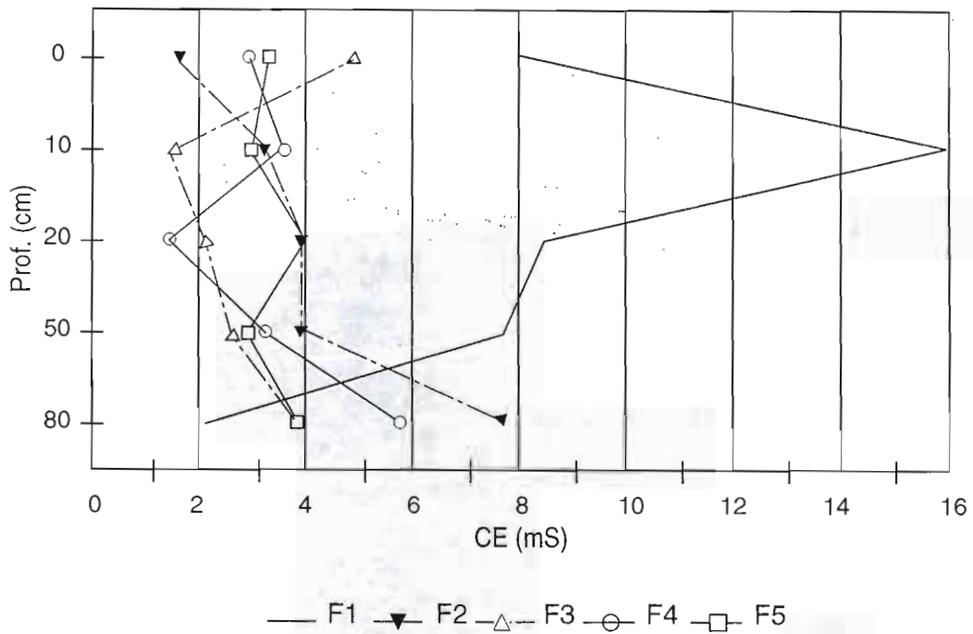


Figura 5.15. Evolución del pH (H2) 1:2.5) a diferentes profundidades, Laruta 3 (Hervé et al., 2001)

(zd)



(zd)

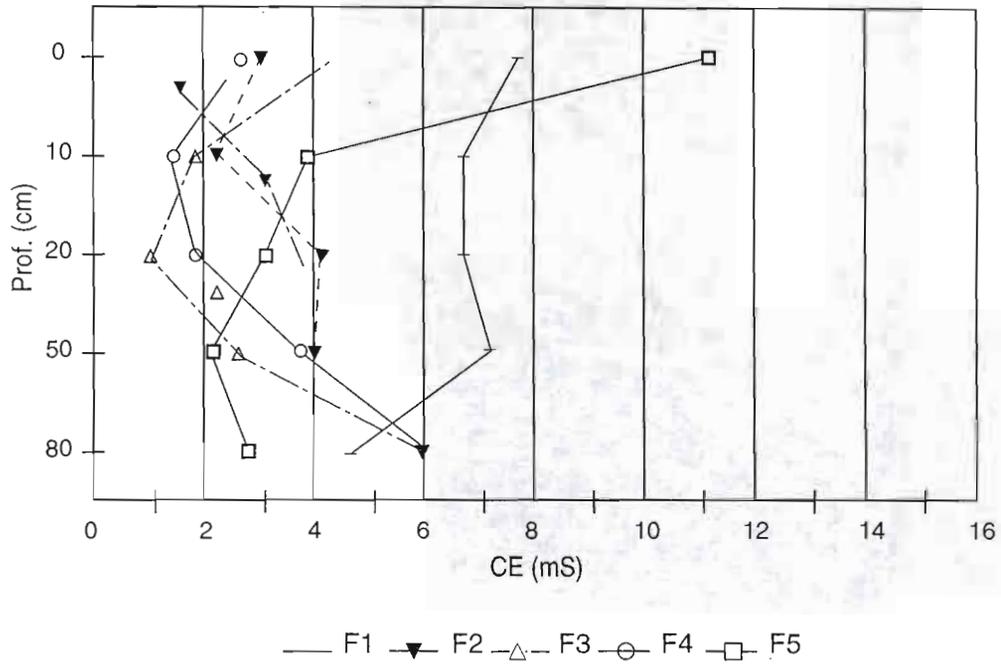
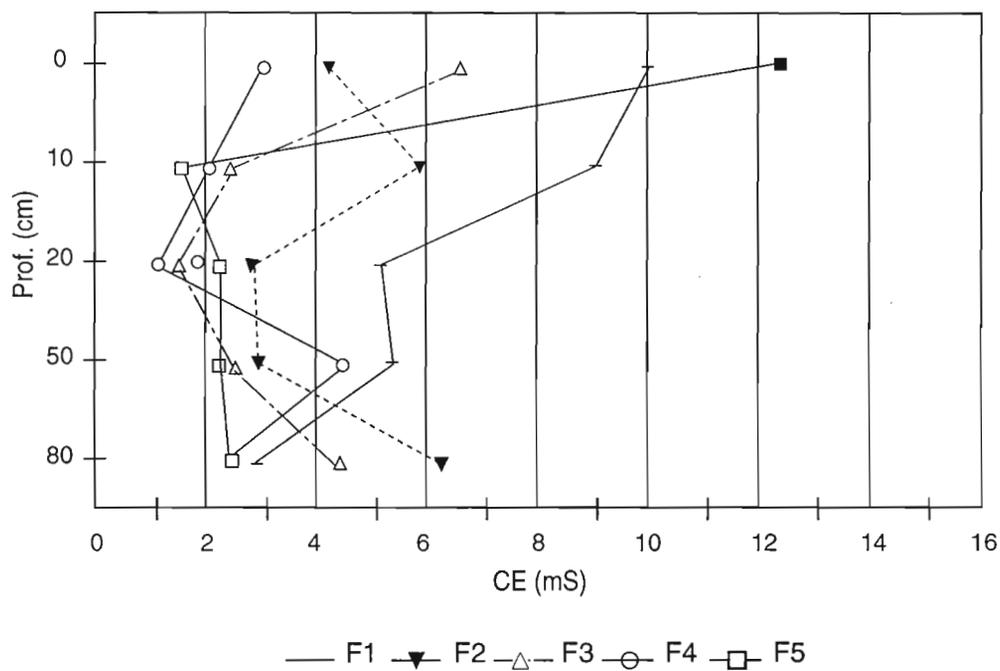


Figura 5.16. Evolución de la conductividad eléctrica en los tratamientos zanja derecha e izquierda, Laruta 3 (Hervé *et al.*, 2001)

(szd)



(szi)

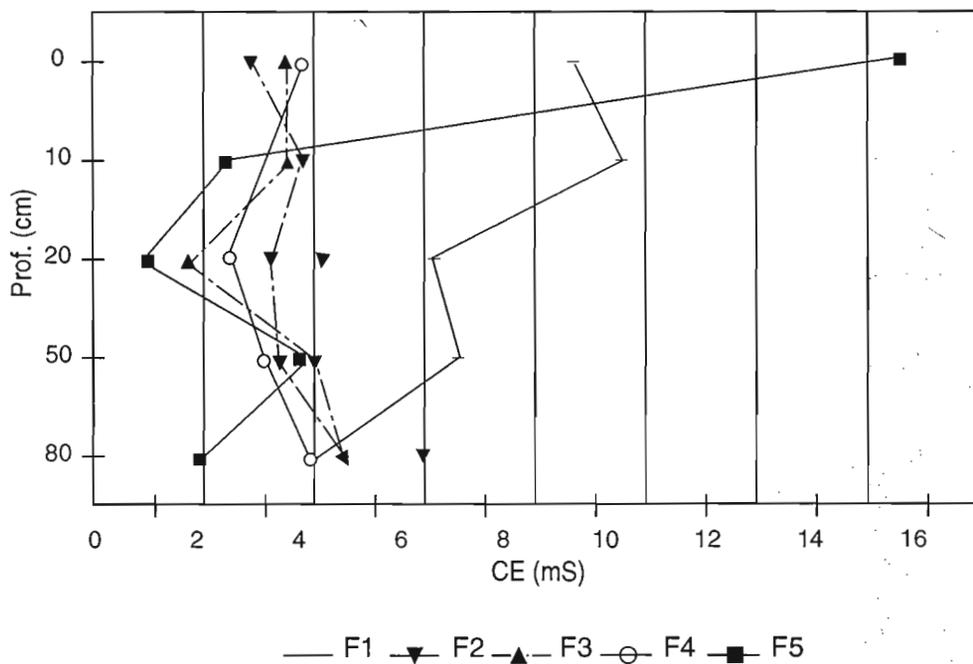


Figura 5.17. Evolución de la conductividad eléctrica en los tratamientos subsolado-zanja derecha e izquierda, Laruta 3 (Hervé et al.,2001)

Las curvas de conductividad son bastante similares entre tratamientos (zanja en Fig. 5.16 y subsolado en Fig. 5.17). Demuestran que el proceso de lavado de las sales en 0-50 cm se realiza entre la primera y la segunda fecha, con una rebaja de la conductividad por debajo de 4 mS cm⁻¹ en 20-50 cm y una recarga resultante en el horizonte 50-80 cm. Los datos de precipitación diaria confirman esta interpretación. La germinación e instalación de los cultivos se logró con los 29 mm caídos justo después de la siembra. Los 96 mm caídos entre el 15 y el 18 de enero 1996, seguidos de 29 mm esparcidos, han sido suficientes para drenar las sales dentro del perfil hasta profundidades superiores a 50 cm cuando así lo permitía el trabajo profundo del suelo. Las precipitaciones de 55 mm en marzo y 21 mm en abril permitieron a los cultivos completar su ciclo. La mayor variabilidad de conductividad se observa en el horizonte 50-80 cm. Entre las fechas 4 y 5, su valor disminuye a más de 80 cm de profundidad y aumenta mucho en la superficie del suelo. La conductividad tiende a invertirse a partir de la fecha 5. Al final, la conductividad de la costra es más elevada que al principio en casi todos los tratamientos. En las demás profundidades, se mantiene debajo de 4 mS cm⁻¹.

Comparación de Laruta 2 y 3

Para detectar un efecto del suelo, en sus diferentes profundidades, se compara con el programa SAS los resultados de conductividad eléctrica entre ambas parcelas (cuadro 5.5), en función de tres factores explicativos : parcela (2 modalidades), tratamiento (4 modalidades) y fecha (F2 y F3 durante el cultivo; F2 a F4, en la etapa de drenaje de sales ; F4 y F5 en la etapa de desecación post-cultivo).

Cuadro 5.5. Comparación de la conductividad eléctrica entre parcelas, fechas y tratamientos

Factores	Modelo	Grados de libertad	F calculado	Probabilidad
1) Fechas F2, F3; Prof. 0-20 cm	Modelo	15	0.66	0.6651 NS
2) F2, F3, F4; Prof.>50 cm	Modelo	23	3.66	0.0162 S
	Parcela		9.46	0.0068 HS
	Tratamiento		3.72	0.0319 S (zi>sz)
3) F4, F5; Prof. >50 cm	Modelo	15	3.73	0.0363 S
	Tratamiento		4.93	0.0236 S (zi>sz)

La conductividad del suelo, debajo del subsolado, resulta significativamente mayor en Laruta 3 que en Laruta 2, en la etapa de drenaje. Este resultado revela las diferencias entre los perfiles de ambas parcelas. La variable conductividad del suelo diferencia los tratamientos: Zanja izquierda > Subsolado zanja izquierda; Zanja izquierda > Zanja derecha; Subsolado zanja derecha > Subsolado zanja izquierda. El tratamiento con menor conductividad es el Subsolado-zanja izquierda: En la etapa de desecación del perfil, o sea de circulación ascendente de las sales en suspensión, el factor parcela no parece significativo.

Cuadro 5.6. Rendimiento promedio en MS (kg/ha), Laruta 2 y 3, 1995-96

Cultivo	Laruta 2		Laruta 3	
Quinoa	341.6	A	97.2	B
Triticale	618.9	A	106.7	B
Cebada	470.9	A	24.5	B

A los 102 días, las alturas de plantas son mayores en los tratamientos Subsolado-zanja en comparación a Zanja solamente, cualquiera sea el cultivo. El rendimiento muy bajo de la cebada en Laruta 3 se debe a una incidencia de Roya; nos limitaremos a comparar los resultados en quinua y triticale (Cuadro 5.6). Los resultados en Laruta 2 son muy superiores a Laruta 3, a la inversa de la conductividad eléctrica de los suelos de ambas parcelas. Esta diferencia de rendimiento es más importante en triticale (1 a 6) que en quinua (1 a 4) por ser la gramínea más sensible a la salinidad. Los modelos que explican el rendimiento de MS de triticale y de quinua por parcela, bloque y tratamiento resultan altamente significativos (ddl = 23, Pr < 0,001). En ambos cultivos sale primero el efecto de la parcela (HS) y luego del tratamiento (S), sin significancia de bloque. La combinación subsolado-zanja logra duplicar la producción de biomasa en ambos cultivos, sin diferencia significativa según la orientación del surco (cuadro 5.7).

Cuadro 5.7. Efecto de los tratamientos en el rendimiento MS (kg/ha)

Tratamiento	Triticale		Quinoa	
Szi	568.4	A	335.28	A
Szd	461.1	AB	296.62	A
Zi	225.0	B	126.53	B
Zd	196.6	B	119.03	B

5.2.4. Conclusiones sobre el trabajo del suelo

El paso de un subsolador antes del surcado con discos afloja el horizonte arcilloso compacto y favorece el drenaje de las sales en profundidad fuera del alcance de las raíces y un descenso de la conductividad eléctrica por debajo de 4 mS cm^{-1} . Permite en consecuencia un mayor crecimiento de los cultivos. Es preferible adelantar la fecha del laboreo profundo antes de las primeras precipitaciones para favorecer el drenaje de las sales justo antes de la siembra.

El efecto de drenaje, obtenido con el subsolado, repercute en el rendimiento de quinua como de cereales. El descenso de conductividad eléctrica que resulta de este laboreo en el suelo salino colonizado por las raíces es temporal; desde la fecha 5 (2/07/96), la tendencia se invierte. Es probable que las condiciones sean entonces menos favorables para la instalación de un cultivo siguiente, que podría ser forrajero (kauchi, alfalfa). En suelos arcillosos, existe el riesgo de que el efecto benéfico del subsolado no se mantenga varios años seguidos. Estaba prevista la observación de calicatas en 96 en las parcelas cosechadas en 95, para comprobar si el dren creado por la subsoladora seguía funcionando, pero no se la pudo realizar. Asimismo, la subsoladora ha sido modificada para incorporar guano de ovino, abundante en la zona, dentro de la zanja abierta por la reja, de manera a mantener más tiempo en actividad la fisura creada en el horizonte arcilloso (foto 5.5). Ya se experimentó el uso de guano ovino combinado con el paso del subsolador (Quisbert, 1997), pero sin aplicarlo al mismo momento del trabajo con el subsolador.

Para acompañar la difusión de este sistema de labranza se necesitaría comparar diferentes anchos de tablas de escurrimiento entre zanjas vecinas y realizar los balances económicos correspondientes.

No se descarta un efecto de la posición relativa del surco en relación al camellón y a la tabla de escurrimiento inter surcos, dejada sin laboreo. La diferencia de conductividad eléctrica observada no se traduce en diferencias de rendimiento. No se tiene actualmente un cuadro explicativo del mejor resultado obtenido por un surcado en zanja izquierda.

Observaciones adicionales junto con la difusión de este sistema de labranza permitirían comparar diferentes anchos de tablas de escurrimiento y realizar el balance económico correspondiente. También quedan por precisar las condiciones de introducción de kauchi o de alfalfa después de un primer año de cultivo.

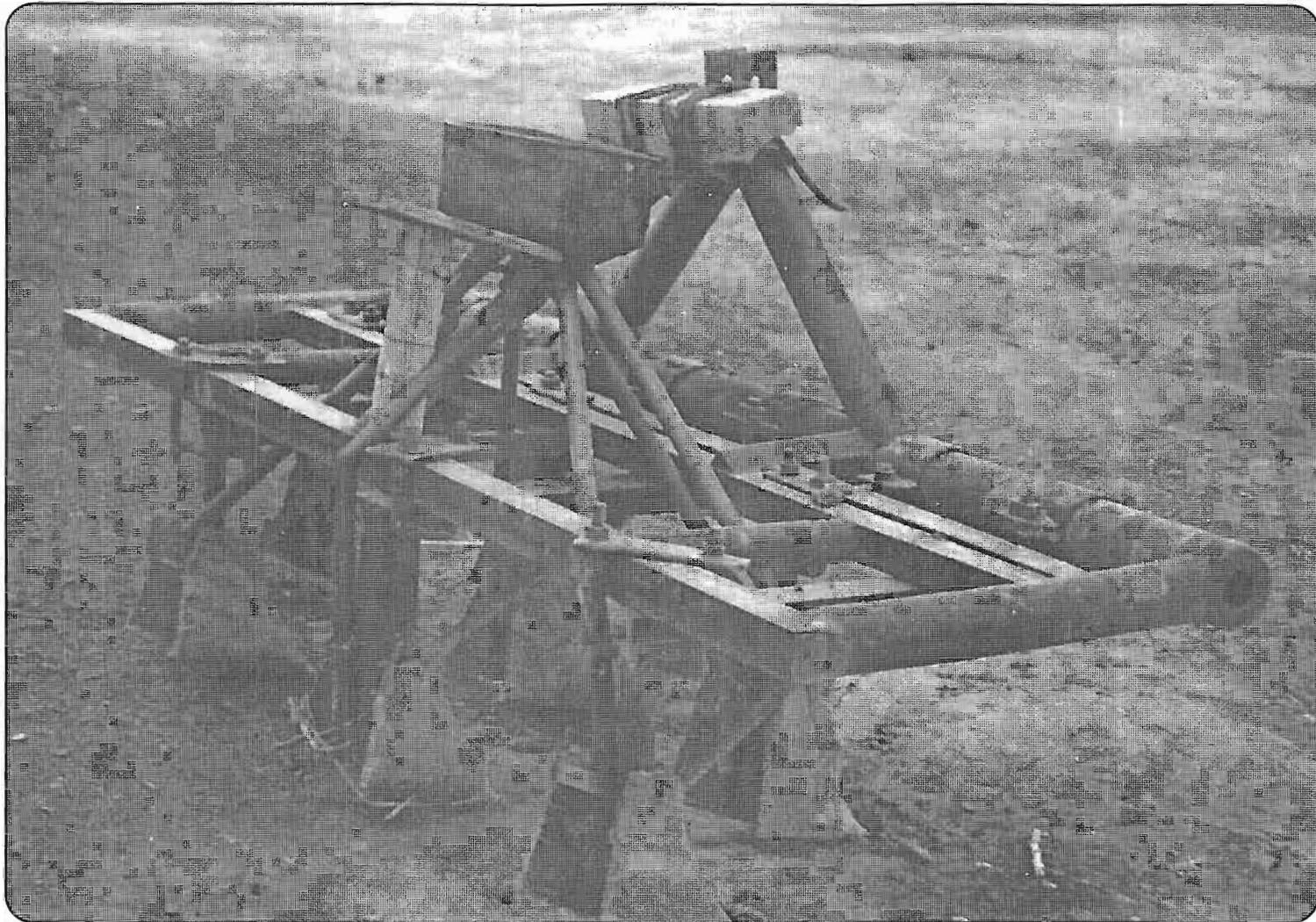


Foto 5.5. Subsoladora equipada para incorporar guano (Hervé).

5.3. Siembra de especies tolerantes

5.3.1. Potencial de producción de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en Gualberto Villaroel (S-E. Jacobsen, H. Bosque)

Introducción

La provincia Gualberto Villarroel incluye dos zonas bien diferenciadas, una primera zona al extremo sur occidental, formada por serranías, pequeñas terrazas, ríos y riachuelos, con altitudes de 3900 a 4000 m. La segunda zona fisiográfica comprende la llanura fluvio lacustre y la zona de transición que cubre aproximadamente un 80 % (1555 km²) de la superficie provincial, cuya parte más baja es de 3715 m en la parte oriental, y va subiendo hacia el oeste hasta la cota 3900 m. La zona de piedemonte hasta la cota 3800 m no presenta problemas de salinización, pero la planicie por debajo de este nivel se caracteriza por la presencia de amplias superficies con suelos salinos y salino-sódicos. Las precipitaciones son escasas (250 a 350 mm) en la llanura oriental y no pasan de 400 mm en las partes altas o serranías. Una parte de la salinidad del agua proviene de afluentes del Desaguadero como el río Tarcamaya que en la época de estiaje tiene una conductividad eléctrica alta (38 mS cm⁻¹).

Bajo estas condiciones, gran parte del territorio de esta provincia tiene muy poco potencial para el cultivo de las glicófitas alimenticias, En suelos salinos solamente se tienen algunas forrajeras nativas en forma permanente, como el caso de los géneros *Distichlis*, *Suaeda* y *Atriplex*, y en suelos altamente salino-sódicos sólo se presentan halófitas propias de estos hábitats, *Junellia* y *Suaeda*. Sin embargo, la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y la cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) son cultivadas, hasta en suelos con alta salinidad, por su rusticidad frente a los factores medio ambientales y su valor nutricional.

Tolerancia a la salinidad de cultivares de quinua

En general, la salinización de los suelos es uno de los problemas que limita mas seriamente el rendimiento de los cultivos. La utilización de estos suelos requiere de técnicas agronómicas específicas y del uso de especies tolerantes o mejoradas genéticamente. Una de las especies con mayor tolerancia a la salinidad es la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), que es cultivada

mayormente en las zonas áridas y semiáridas (Laboratorio de Suelos de los E.U.A., 1993). A pesar de las condiciones ambientales extremas en que prospera la quinua, ésta ha sido poco estudiada respecto a su comportamiento frente a la salinidad.

Respecto al comportamiento de la quinua en un medio salino, se ha reportado que las concentraciones salinas entre 8.1 y 16 mS cm⁻¹ de conductividad eléctrica (CE) son letales para el crecimiento de la quinua (Cari, 1978). Bajo condiciones de estrés salino y sequía, Bosque (1998) encontró que la resistencia estomática de la variedad Real (ecotipo de los salares de Bolivia) fluctúa de 4,8 a 16,1 mS cm⁻¹ y de 12,2 a 28,2 mS cm⁻¹ bajo 7,77 y 11,88 mS cm⁻¹, respectivamente. Pese a estas fluctuaciones, se puede observar tendencias a mayor resistencia estomática al incrementar los niveles de salinidad. Respecto al potencial de agua foliar, los valores máximos obtenidos fueron de -1,59 y -1,88 MPa, bajo 7,77 y 11,88 mS cm⁻¹ de conductancia, respectivamente. Garcia (1991) indica que un cultivar de quinua dulce bajo riego tenía su potencial foliar entre -1.1 y -1.9 MPa, sin irrigación, entre -1.5 y -2.8 MPa.. Para un cultivar amargo, el rango es ligeramente mas alto, entre -1.3 et -2.2 MPa con riego y entre -1.5 y -3.0 sin riego. En caso de stress, los valores alcanzados son más bajos.

Dos variedades de quinua, Utusaya de los salares del sur de Bolivia, y 03-26-0036 del altiplano peruano de Puno, mostraron tener mecanismos de resistencia a un medio salino, como la disminución del potencial de agua foliar y la disminución de la apertura estomática (Jacobsen *et al.*, 2000). Estos caracteres permitieron mantener el turgor de las células y disminuir la transpiración, evitando la sequía fisiológica que pudo haber causado la muerte de las plantas. Para regular el potencial de agua foliar, las dos variedades de quinua acumularon sales en su sistema, absorbiendo los iones disponibles en el medio. Se observó que algunos caracteres como área foliar, biomasa, rendimiento de semilla e índice de cosecha, tuvieron mejores respuestas bajo medios salinos comprendidos entre 10 y 20 mS cm⁻¹ de CE, comparado con un medio menos salino. Estos resultados indican que la quinua es una halófito facultativa (Quispe & Jacobsen, 1999a,b).

En el rendimiento de semilla por planta hubo diferencias altamente significativas entre cultivares, siendo superior Utusaya ($2,4 \pm 0,95\text{g}$), seguido por 03-26-0036 ($2,0 \pm 0,6\text{g}$), comparado con el amaranto Oscar Blanco ($0,4 \pm 0,4\text{g}$). En Utusaya y 03-26-0036, los mayores rendimientos se obtuvieron con 15 mS cm^{-1} de CE. A CE mayores a 15 mS/cm los rendimientos tuvieron tendencias decrecientes en ambos cultivares. En el amaranto el rendimiento mayor ($16,6 \pm 1,9\text{g}$) se obtuvo con 5 mS cm^{-1} y no se obtuvieron semillas con 35 y 40 mS cm^{-1} de conductancia (Fig. 5.18).

El índice de cosecha mostró diferencias altamente significativas entre cultivares, con el porcentaje mayor que correspondió al cultivar Utusaya ($40 \pm 7\%$), seguido por 03-26-0036 ($28 \pm 8\%$) y por último el amaranto Oscar Blanco ($9 \pm 7\%$). Los porcentajes mayores del índice de cosecha tuvo Utusaya con 25 mS cm^{-1} de CE ($46 \pm 7\%$), en 03-26-0036 con 15 mS cm^{-1} de CE ($36 \pm 7\%$), y en el amaranto con 5 mS cm^{-1} de CE ($16 \pm 2\%$) (Fig. 5.19). Las concentraciones de salinidad, bajo las cuales se obtuvieron estos índices, fueron mayores para los dos cultivares de quinua respecto al cultivar de amaranto. Estos resultados muestran el mejor comportamiento de Utusaya bajo condiciones de salinidad, transformando eficazmente los asimilados en semilla, sugiriendo que tuvo mayor capacidad para reproducirse bajo condiciones estresantes.

Utusaya, de la parte sur de Bolivia, mostró tener mayor aptitud para la producción de semilla, su rendimiento y el índice de cosecha fueron superiores. La conductividad eléctrica letal medio (CE_{50}), que es la conductividad eléctrica a la que disminuye en 50% el valor de una variable, fue de 24 mS cm^{-1} para rendimiento de semilla, mientras que para 03-26-0036 fue 22 mS cm^{-1} . En cambio 03-26-0036 tuvo una ventaja para la producción de biomasa, por lo que para este cultivar altura de planta y biomasa tuvieron mejor respuesta. Por tanto, bajo condiciones de salinidad, es posible cultivar y mejorar genéticamente diferentes cultivares de quinua para producción de semillas y forraje (Jacobsen *et al.*, 2000).

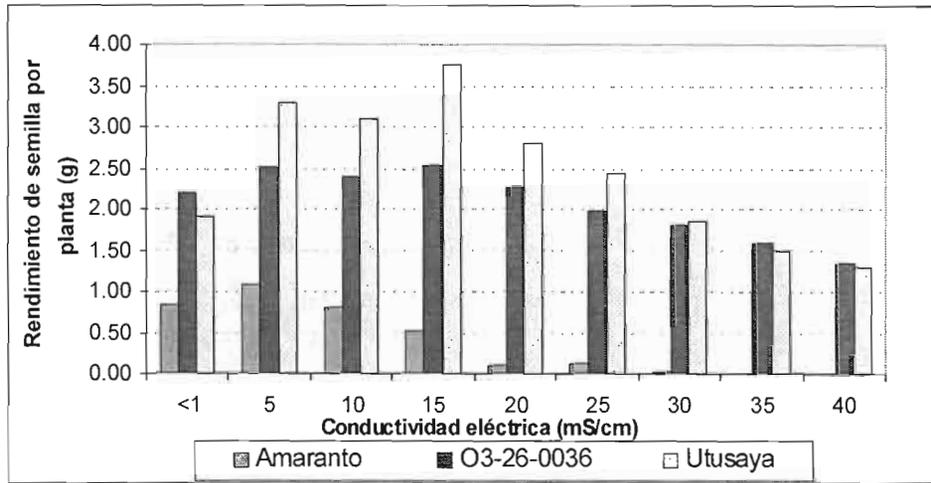


Fig. 5.18. Rendimiento de grano de quinua cultivares 03-26-0036 y Utusaya, y el amaranto Oscar Blanco, regados con 9 niveles crecientes de CE de solución salina (Quispe y Jacobsen, 1999a).

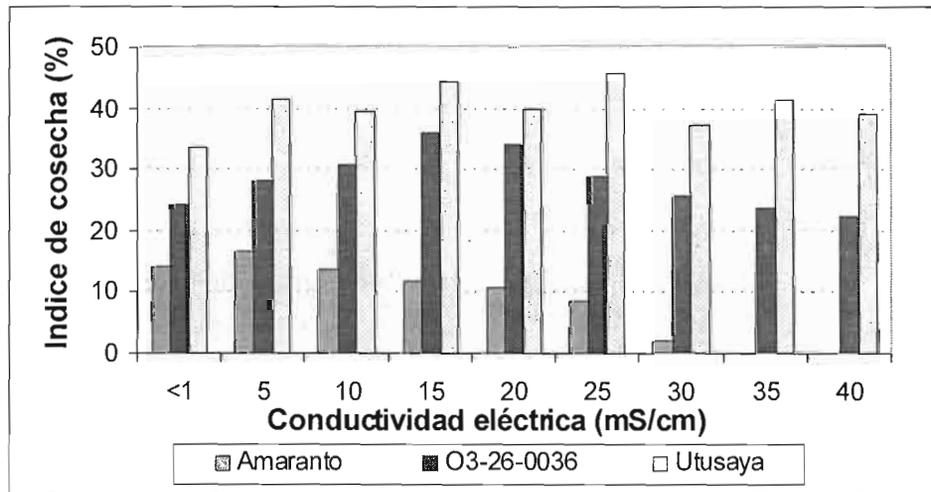


Fig. 5.19. Índice de cosecha de quinua cultivares 03-26-0036 y Utusaya, y el amaranto Oscar Blanco, regados con 9 niveles crecientes de CE de solución salina (Quispe y Jacobsen, 1999a).

En función al parámetro de tolerancia CE_{50} , se estableció que las variables agronómicas más sensibles a la salinidad fueron la altura de planta, el peso y tamaño de panoja. Incrementando estos caracteres se puede incrementar el rendimiento de semillas de quinua en un medio salino. La apertura estomática se comportó como la variable menos tolerante a la salinidad. El rendimiento de semilla en cebada (*Hordeum vulgare* L.) se redujo en 50% con 17 mS cm^{-1} de CE (Subbarao, 1998), indicando menor tolerancia a la sal que la quinua.

Cultivo de la quinua en G. Villarroel

El Altiplano central correspondiente a la provincia G. Villarroel esta dedicado principalmente a la ganadería y luego a la agricultura. El manejo de cultivos está restringido a pequeñas parcelas que en la mayoría de los casos no pasan de los 1500 m^2 , con cultivos predominantes de papa, quinua y cebada en las partes alta y media. En la planicie la tenencia de la tierra es mayor, por ende las superficies cultivadas son más grandes (1 ha o mayores). Aparece en la llanura el cultivo de haba. La alfalfa, forrajera que ha adquirido importancia en los últimos años por la promoción de la producción lechera bovina, cubre superficies considerables, en aquellas localidades que poseen riego y al mismo tiempo no tienen problemas de inundación periódica.

El cultivo de la quinua adquiere mayor importancia en aquellas áreas con mayor grado de salinidad, observándose relativa diversidad en el manejo de variedades, predominando quinuas negras, criollas (rojas y blancas) y algunas introducidas del grupo de las quinuas reales (Bosque, 1998).

La quinua ingresa generalmente dentro del sistema de rotación papa-quinua o cebada en las partes alta y media. En cambio en la planicie, en aquellos lugares donde no existe la posibilidad de establecer otros cultivos por el alto grado de salinidad y/o sodicidad, en suelos vírgenes se siembra solamente la quinua y cañihua, en una forma distinta a la de las zonas tradicionales de cultivo. Primero el cultivo en hoyos, que consiste en la siembra de quinua directamente en el suelo sin labranza alguna, solamente abriendo hoyos de 30 a 50 cm de diámetro y dejando un metro entre cada uno (entre surcos y entre plantas) con 5 a 12 cm de profundidad. Esta práctica era generalizada en el pasado, pero actualmente se utiliza más el tractor agrícola con el que se practica el segundo método de siembra en zanjas. Consiste en la apertura de surcos con arado de

discos, distanciados aproximadamente entre 0.8 y 1.0 m hasta 2 a 4 m entre ellos, dejando un canal donde se concentra el agua y cuyos bordes pueden recibir las semillas con menor tasa de salinidad.

Las superficies cultivadas van desde 0.08 hasta 3.62 ha por familia, con un promedio de 1.39 ha (YUNTA, 1992). Sin embargo, estas cifras no significan que todas las familias campesinas sean productoras de quinua, por lo que la superficie cultivada a nivel de toda la provincia se estima en 1242 ha (ZONISIG, 1998; YUNTA, 1992; INE, 1992), con una producción anual de 372.6 toneladas métricas. Las superficies de cultivo, relativamente altas en promedio, son por la tenencia de la tierra y los sistemas de cultivo que se practican. Esta característica concuerda también con lo que se señala en la amplia variación de la cantidad de semilla utilizada por unidad de superficie, así en promedio utilizan 8 kg/ha, observándose extremos de 1.25 hasta 12 kg/ha. Estas cantidades se deben al sistema de cultivo que practica el agricultor. Así, la mayor densidad es cuando el agricultor siembra en forma extensiva al voleo en surcos, y la menor densidad es cuando siembra cultivos asociados de papa, haba, etc.. También es menor en suelos con problemas de salinidad y déficit hídrico, donde se establecen pocas plantas por unidad de superficie, con los métodos por hoyos y zanjas.

Los rendimientos son tan variables como lo son los sistemas de cultivo y las condiciones medio ambientales locales. Se han observado rendimientos tan bajos como 62 kg/ha, hasta relativamente altos como 816 kg/ha, con un promedio provincial de 300 kg/ha (PDM, 1998; Bosque, 2000a).

En el caso de la cañihua, este cultivo también parece tener un buen potencial, especialmente en los suelos de mayor salinidad cultivados por zanjas. Según Ledezma (com. personal, 2000), el Centro Yunta en la campaña agrícola 98/99 ha establecido 143 ha en la llanura fluvio lacustre con cañihua. Para el resto de la provincia, particularmente en la parte Media y Alta, predominan cultivos como la papa, haba, cebada, quínua y otros, por lo que la cañihua se siembra en superficies muy reducidas.

Usos de la quinua y problemas actuales para su producción

A pesar de numerosas investigaciones sobre este cultivo en el pasado, los resultados y las tecnologías generadas en los centros experimentales raramente han sido transferidos a las áreas rurales. Así, hoy en día, la quinua se sigue cultivando para la alimentación humana, en forma de sopas, ají y pitos. En los últimos años, en la parte baja de la provincia, el Centro Yunta ha fomentado la utilización de harina de quinua en la panificación. Algunos antecedentes indican que, en el pasado, cuando no existía el jabón, los nativos utilizaban la “lavasa” (saponinas) como detergente para lavarse los cabellos y a veces la ropa (com. personal agricultor anciano de Papel Pampa, 1999). Los tallos secos se queman hasta ahora para la fabricación de la llujta o lejía (pasta a partir de las cenizas), que sirve para facilitar la extracción de alcaloides al masticar la coca (*Erythroxylon coca*). En algunas zonas benignas y en años buenos, los tallos de la quinua alcanzan alturas de hasta 1.5 m con diámetros de 2 a 4 cm, con los que a la cosecha fabrican trojes para almacenamiento de alimentos. Se le ha dado poca atención a la planta de quinua como alimento animal. Los restos de la cosecha, como los tallos y rastrojos de la trilla, se dejan en el campo o se utilizan a veces como combustible o para fabricar lejía. El uso de las hojas y las panojas tiernas como verdura, indicado en la bibliografía, no se ha reportado en esta zona.

A pesar de ser una especie nativa de los Andes y considerada rústica frente a los factores medio ambientales típicos del Altiplano, el cultivo de quinua presenta múltiples dificultades para constituirse en un cultivo de uso masivo. Si bien en los últimos años se ha incentivado el establecimiento de alfalfares para la ganadería lechera, que actualmente se constituye en uno de los rubros más importantes de ingresos monetarios para la familia campesina, no existe asistencia técnica para la actividad agrícola.

Para su seguridad alimentaria los campesinos manejan variedades nativas y una mezcla de las mismas. Esta apreciación proviene de observaciones en las ferias locales, cuando se ven multitud de colores y distintos tamaños de granos (pequeños en general) en una muestra; y, en las chacras campesinas en la etapa de crecimiento cuando la parcela de quinua se viste de una gama de colores, y se nota la variabilidad de las características morfológicas de las plantas.

El agricultor no protege sus sembradíos de quinua de plagas y enfermedades. Gracias a la rusticidad de las variedades que maneja y las condiciones climáticas propias de la zona, la incidencia de malezas y de agentes patógenos no es de importancia económica, aunque ocasionalmente pueden presentarse problemas serios con el mildiu (*Peronospora farinosa*) y ticonas (*Spodoptera* spp.) (YUNTA, 1992).

Sin duda, las limitantes más importantes son las condiciones climáticas (heladas y sequías), los limitantes edáficos (baja fertilidad química y física) y la calidad y disponibilidad de recursos hídricos. Se observa un elevado grado de erosión hídrica laminar y eólica, como el caso del Piedemonte Superior, donde existe una pérdida casi total del horizonte A. Los suelos de Piedemonte Medio tienen drenaje imperfecto con textura arcillo-limosa; son fuertemente estructurados en bloques angulares con reacción calcárea.

La parte llana generalmente tiene drenaje pobre a muy pobre. Como consecuencia, la llanura se inunda en el período de lluvias, cubriendo grandes extensiones. Cuando las precipitaciones son muy intensas y prolongadas se forman lagunas superficiales. La consecuencia natural de este último fenómeno cíclico es la paulatina salinización y/o sodificación de los suelos, y defloculación de arcillas por los altos contenidos de sodio.

Potencial del cultivo de quinua en G. Villarroel

Las potencialidades que ofrece un ecosistema para un determinado cultivo se enfocan desde el punto de vista económico, social y técnico. Todos estos aspectos intervienen para determinar las potencialidades que tiene la provincia G. Villarroel para el cultivo de la quinua.

Justificación económica

En general la actividad agrícola es de subsistencia, pero genera una pequeña relación con el mercado, sobre todo en el período de cosechas y en época de siembras, donde productos como la papa y sus derivados, quinua, cebada, haba, etc., se constituyen en los productos más comercializados. A pesar de que se desarrolla esta pequeña actividad comercial, la agricultura tradicional no permite generar los excedentes reinvertibles necesarios para sustentar su capacidad productiva. La quinua que se comercializa es solamente a nivel local, sin perspectivas de

crecimiento en volumen, porque el manejo de mezclas varietales y la calidad del grano no son atractivos para otros mercados, nacional o internacional.

El incentivo de la producción de este cultivo andino con fines comerciales tiene muchas perspectivas, porque los volúmenes de exportación todavía no han sido satisfechos de acuerdo a la demanda internacional. A nivel nacional, los precios de la quinua son bastante atractivos para el productor, pero no para el consumidor. Asimismo, los costos de producción son muy bajos en comparación con otros cultivos, sobre todo en las zonas salinizadas, donde la única labor fuerte y más costosa constituye la apertura de surcos o zanjas, luego no se necesitan más actividades hasta la cosecha.

Justificación social

La densidad poblacional de la provincia es de 5.5 hb/km², y se tiene estimado que la tenencia de la tierra es muy variable, desde 12 hasta 250 ha, pero las superficies cultivadas por unidad familiar son mínimas, por ejemplo datos de la parte baja muestran que se utilizan en cultivos anuales entre 0.08 a 2.4 ha (YUNTA, 1992). Esto significa que existen evidentemente amplias superficies sin uso.

Todos los indicadores sociales (tasa de crecimiento, analfabetismo, servicios de salud, etc.) muestran los niveles de pobreza por debajo del promedio departamental. La desnutrición es uno de los problemas crónicos, como en la mayoría de las áreas rurales del país. La expansión de cultivos como la quinua, tendría un efecto significativo en este y otros aspectos sociales.

Justificación técnica

Una propuesta de producción de quinua debe incidir en la mejora de la capacidad de gestión y aplicación tecnológica en todo el proceso productivo. Los problemas técnicos más importantes que deben encararse son el manejo y conservación de suelos y agua, y la generación y aplicación de técnicas de manejo adecuado del cultivo. Esto tiene la finalidad de revertir las condiciones actuales, para cuyo propósito se cuenta con algunos resultados de investigación, tanto en los recursos suelo y agua, como en el cultivo mismo.

Sobre la base del trabajo de Quisbert (1980), hicimos una estimación de las superficies salinizadas de la llanura fluvio lacustre mapeada, en sus diferentes grados, habiendo establecido de que existen 281.9 km² normales, 40.2 km² salinos y 403.1 km² salino sódicos (mayor detalle en el cuadro 4.6). Comparativamente, los resultados hallados por Ledezma (1995), cuyas investigaciones fueron realizadas 12 años después de los datos que analizamos, son casi similares.

En general, los recursos hídricos disponibles son escasos. Así los sistemas de riego existentes, algunos de ellos con más de 20 años de antigüedad, utilizan las aguas del río Desaguadero cuya calidad no es de las mejores. Mediciones registradas entre los meses de septiembre y octubre, muestran una conductividad eléctrica de 1.9 mS cm⁻¹, y en función a este dato y la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), estas aguas se clasifican como C3S1 y C3S2 (aguas con elevado riesgo de salinización, C3; con riesgo bajo a moderado de alcalinización, S1y S2) (Bosque, 2000a,b). Asimismo, Ledezma ha realizado análisis de las aguas subterráneas (pozos) las que en general muestran calidades de clases C2 a C4 (media a muy alta salinidad) y S1 a S4 (bajo a muy alto contenido de sodio).

Ledezma (1995), en su estudio sobre la influencia del riego sobre la salinización de los suelos, señala que los clasificados como altamente salino llega a habilitarse para la producción de la cebada y quínuas por efecto del riego, debido a que el agua de riego disminuye la alta salinidad del suelo. Señala que existe una sodificación del horizonte superficial en 2.82 PSI/año, niveles que no son limitantes para cultivos como alfalfa, cebada, quínuas y cañihua.

El suelo clasificado como altamente salino alcalino, por efecto del riego, pasa a ser salino y no alcalino, lo que posibilita la producción de los cultivos de la zona con limitaciones ligeras para la alfalfa, y sin ninguna limitación para el resto de los cultivos de la zona. El suelo clasificado como normal se mantiene normal superficialmente, pero se saliniza en los horizontes inferiores; luego de 15 años de riego no presentan problemas de salinización y/o sodificación que limiten la producción de cultivos.

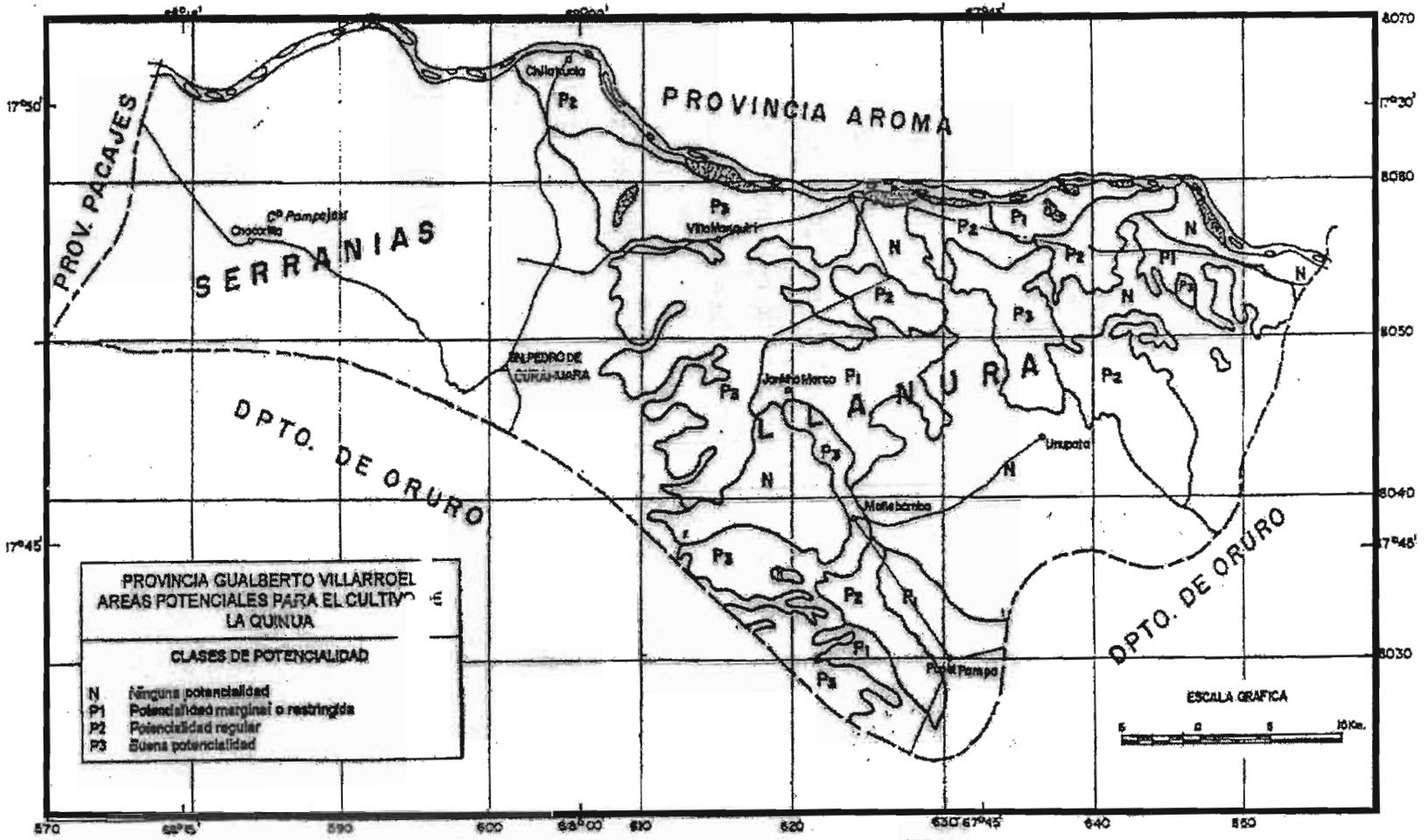
El suelo salino, con horizontes inferiores altamente salino alcalinos, utilizado con riego, disminuye en su contenido salino, sufriendo un proceso de sodificación en el primer horizonte. De esta manera los terrenos se habilitan para el establecimiento de la alfalfa y la cebada aunque no en un 100%. Al parecer las precipitaciones existentes en la provincia son suficientes para la producción de las dos quenopodiáceas, sin embargo, el problema radica en que la distribución de las lluvias; las precipitaciones muy intensas en períodos cortos son comunes y las inundaciones frecuentes dañan a la quínoa.

La calidad de las dos fuentes de agua (río Desaguadero y pozos) es insuficiente para las glicófitas, sin embargo, para la quínoa y cañihua no constituyen un problema. Bosque (2000a) demuestra que por la halofilia de la quínoa se debería aplicar otra clasificación de la calidad de aguas. Menciona que una conductividad eléctrica de 10.0 mS cm^{-1} constituye un umbral donde la quínoa todavía mantiene sus rendimientos estables, concordando con Jacoby (1994) al tratar sobre los niveles de tolerancia de las halófitas. Varios estudios han demostrado que ciertas variedades de quínoa tienen tolerancia elevada a la salinidad (Jacobsen *et al.*, 2000).

Áreas potenciales para el cultivo de la quínoa en G. Villarroel (Cuadro 5.8)

En base a los grados de salinidad, topografía y la superficie relativa de la quínoa dentro los cultivos que maneja el agricultor, en cada una de las zonas fisiográficas, se ha elaborado un mapa (Fig. 5.20) que cubre la Llanura y el Piedemonte Bajo. No se tienen mapas detallados de la zona Alta o Serranías.

Figura 5.20. Areas potenciales para el cultivo de quinua en la provincia G. Villarroel (Jacobsen & Bosque, 2000)



**Cuadro 5.8. Areas potenciales relativas para el cultivo de quinua
(Piedemonte bajo y Llanura de G. Villarroel)**

Escala de potencialidad	Símbolo	Area total (km ²)	Area potencial para quinua (km ²)
Ninguna potencialidad	N	457.99	0.00
Potencialidad marginal o restringida	P ₁	196.28	176.45
Potencialidad regular	P ₂	190.33	75.45
Potencialidad buena	P ₃	568.03	56.80
TOTAL		1412.63	308.70

En base a los grados de salinidad, topografía y superficie relativa de la quinua dentro de los cultivos que maneja el agricultor, en cada una de las zonas fisiográficas, se ha definido una escala de potencialidad para el cultivo de quinua y cañihua. La figura 5.20 localiza las zonas sin ninguna posibilidad y tres clases de potencialidad en el mapa de la Llanura y el piedemonte bajo de Villarroel. No se tienen mapas detallados de la zona Alta o Serranías. El cuadro 5.8 indica las áreas correspondientes.

En la zona de potencialidad marginal o restringida (P₁), se considera que los suelos podrían utilizarse solamente para quinua y cañihua. Entonces se retira de la superficie total del área alrededor del 10% correspondiente a las áreas no cultivables como los caminos, canales de drenaje, etc. Están incluidos en la cifra los pastizales con halófitas nativas.

En la zona de potencialidad regular (P₂), se diferencian los suelos salino-sódicos y los suelos salinos. Del total de los suelos salino-sódicos (SS1 y SS2), 90% de los suelos salinos de clase S2 y hasta 10% de los suelos salinos de clase S1 pueden ser utilizables para quinua; el saldo es cultivado en alfalfa, cebada y pastizales naturales.

En las zonas con suelos normales, sin problemas de salinidad, que se califica de potencialidad buena (P₃), los otros cultivos ocupan un renglón más importante, en particular en las zonas altas, y grandes extensiones están ocupadas por eriales y pastizales nativos degradados. En estas zonas, tomando en cuenta el manejo actual de los cultivos, sólo es posible cultivar hasta un 10% del área con quinua (ZONIZIG, 1998).

Finalmente, se obtiene para el Piedemonte bajo y la Llanura de Villarroel un área potencial para quinua de 308.7 km².

En el caso de los suelos salino sódicos (SS1 y SS2), casi el 100% de la superficie es utilizable únicamente con Chenopodiaceas, mientras que los suelos salinos (S1 y S2), no tienen problemas para la quinua y cañihua cuando se manejan adecuadamente, pero son limitantes para otros cultivos. En el caso de los suelos considerados normales, se puede considerar otros cultivos. Por otro lado, en las partes altas hay que añadir a los campos cultivados con quinua y otros cultivos los eriales o terrenos baldíos y los pastizales nativos degradados.

5.3.2. Siembra de Kauchi (*Suaeda foliosa*) en áreas salinas consideradas marginales para la agricultura (R. Ledezma S.)

Introducción

En lo referente a la producción pecuaria, principal actividad económica de la región, y ante la poca disponibilidad de forraje y su alto contenido de fibra, se planteó en YUNTA la necesidad de realizar una evaluación de las praderas nativas, llegando a la conclusión que la recuperación y habilitación de estas praderas pasa por la recolección y siembra de semillas de pastos nativos.

En una zona con más del 70% de áreas marginales, resulta de crucial importancia promover la habilitación y recuperación de éstas para la agricultura y la producción de forraje para el ganado. Actualmente la producción de forraje (1 ha de alfalfa, 2 de cebada por familia), mayormente en seco, no abastece a la mayoría de las familias de la región.

El cultivo de alfalfa, introducido en la zona hace más de 30 años, sigue extendiéndose. La alfalfa se siembra con bastante éxito entre diciembre y enero en más de 80% de las comunidades estudiadas por YUNTA (Ham Papel Pampa - Yunta, 1996). La cosecha se da generalmente al año de la siembra. El agricultor lleva su ganado al primer pastoreo llamado ramoneo, para simular el rebrote. En algunos casos, se efectúa el primer corte en el mes de enero, el segundo en febrero y el tercero si las precipitaciones lo permiten entre los meses de marzo, abril y mayo. Son entonces dos a tres cortes al año a los cuales hay que añadir dos ramoneos, al inicio y al final. La producción anual de materia seca aumenta con la edad del alfalfar, hasta unos 10 años para luego tender a bajar (cuadro 5.9). Esta situación implica que cualquier alternativa forajera se tendrá que comparar con la productividad alcanzada por la alfalfa y con su costo de instalación.

Cuadro 5.9. Rendimiento de alfalfa en Villarroel

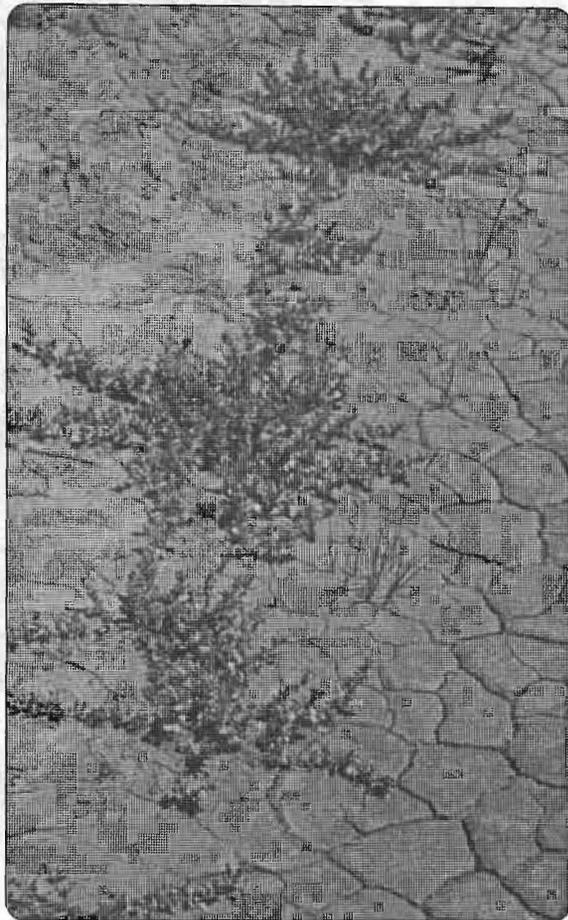
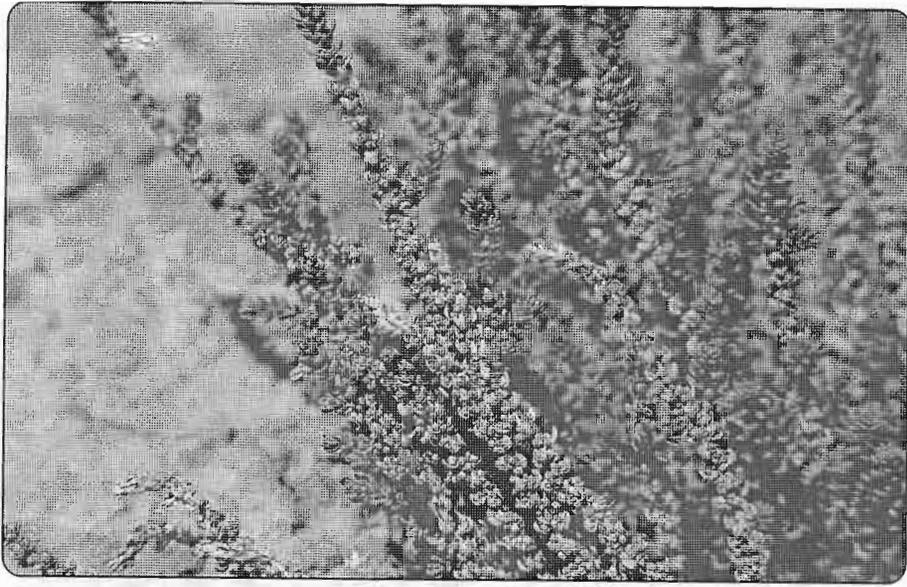
Rendimiento	Producción T MS/ha según la edad del alfalfa				
	1 año	3 años	5 años	7 años	20 años
Bueno	NC	2,7	13,5	16,8	8,4
Regular	NC	1,35	6,75	10,1	5,05

Se recuperó entonces el conocimiento y experiencias de los comunarios que hace más de 25 años introdujeron el kauchi (*Suaeda foliosa*), forrajera nativa tolerante a la salinidad, en comunidades de la Segunda Sección de la Provincia G. Villarroel. Los pobladores de Villarroel, aparentemente no se acostumbran al habito erecto, de tipo arbustivo, de otra halófito forrajera, *Atriplex alimus*. La instalación es lenta al inicio: las matas deben ser protegidas de los animales durante tres años, con riego mensual al inicio, de manera a instalar el sistema radicular pivotante que, luego de tres años, puede alcanzar 25 m. Las experiencias de introducir *Atriplex alimus* en San Jose de Llanga no tuvieron el mismo éxito que el kauchi (Prieto & de Queiroz, 1995). Al segundo año de establecimiento, 69% de las plantulas sobreviven en textura arenosa, 33% en textura arcillosa y 9% en textura arcillo-arenosa.

Descripción de la propuesta productiva

El kauchi (*Suaeda foliosa*) es un planta de porte bajo que es tolerante a suelos salinos. Según Alzerreca (1986), los arbustales de kauchi pueden llegar a tener una producción de 1.300 kg MS ha⁻¹ cuando tienen mas de 5 años. En Villarroel, evaluaciones hechas en 1996-98 dan para kauchiales de dos años, implantados en zanjas espaciadas de 2.5 m, una producción de 322 kg MS ha⁻¹, o sea un valor similar a la de un Tholar pajonal (392 kg MS ha⁻¹) o un Gramadal (291 kg MS ha⁻¹).

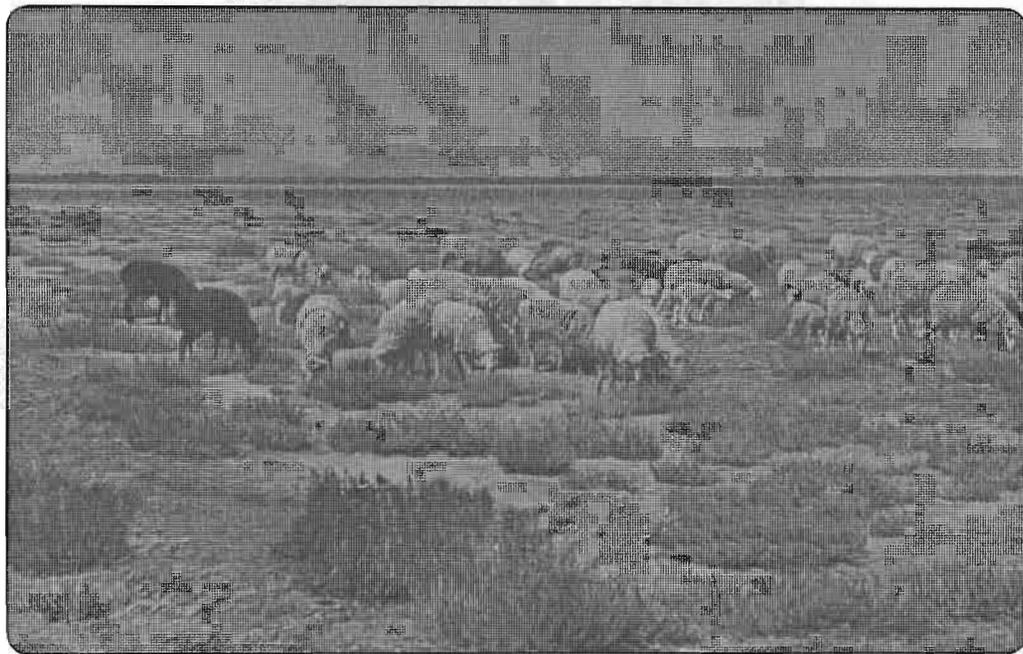
Bustamante & Ruiz (1988) determinaron en la pampa de Caracollo el contenido en nutrientes del kauchi: 16.7% de proteína cruda en las hojas y valores altos de minerales como calcio, fósforo, potasio, sodio. El follaje queda lleno de agua en la época seca. Según Lorini et al. (1984), el kauchi se adapta a condiciones térmicas extremas y a altos contenidos de sal, de 9 a 12 g.kg⁻¹ en 5-30 cm y 32-67 g.kg⁻¹ en costras de 0-2 cm. Puede extraer agua de suelos salinos, donde la solución del suelo tiene un potencial osmótico hasta de 80 bars, por los altos valores de tensión de succión en sus tejidos como en el xylema. Otras adaptaciones fisiológicas son las hojas suculentas y la caída de las hojas en la época seca. Según Colque (1999), la producción de materia verde con alta salinidad supera la obtenida con baja salinidad, por la capacidad de concentrar la sal en sus hojas que se vuelven más turgescientes.



Fotos 5.6. Kauchi (Suaeda foliosa).

Arriba: semilla de kauchi (Ledezman).

Abajo: inicio de la instalación del kauchi (Hervé).



**Fotos 5.7. Kauchi (*Suaeda foliosa*) (Ledezma).
Arriba: pradera de kauchi.
Abajo: kauchi, recurso forrajero**

No hay información disponible sobre el ciclo vegetativo del kauchi, sin embargo se conoce el ciclo vegetativo de la *Suaeda fruticosa*:

<i>Rebrotamiento</i>	<i>Nov.</i>
<i>Elongación</i>	<i>Dic. Ene.</i>
<i>Floración:</i>	
<i>Inicio 10%</i>	<i>Ene.</i>
<i>Plena floración:</i>	<i>Feb-Mar.</i>
<i>Fructificación:</i>	
<i>Inicio 10%</i>	<i>Mar.</i>
<i>Plena 75%</i>	<i>Abr.</i>
<i>Semillado</i>	<i>Jun, Jul, Ago.</i>
<i>Deshojado</i>	<i>Ago, Sep, Oct.</i>

El ciclo vegetativo de esta especie es de aproximadamente 12 meses. Según Portugal & Alzerecca (1992), la mortandad a la germinación alcanza 68% en promedio, por ser una planta pluriannual y se considera un año para su implantación. Según Pozo & Alzerecca (1992a,b) la eliminación de la cubierta externa de la semilla, sea manualmente o con escarificación física con zarandas, sea con agua más salitre, permite ganar un año en su implantación. También la siembra en macetas y posterior trasplante a campo abierto asegura un prendimiento de 90%.

Sobre el tiempo de vida útil del Kauchal no se tienen referencias exactas, sino cerca de la Joya, se tienen kauchales con más de 14 años en plena producción. Tradicionalmente el kauchi en la zona baja de la Provincia Gualberto Villarroel es poco cultivado debido a su bajo poder germinativo y por el desconocimiento de técnicas apropiadas para su cultivo. Antes de la ejecución del proyecto el área en Kauchi era de 140 ha: 20 ha en Colque Amaya, 64 ha en Unupata y 56 ha en Rivera, resultante de su introducción por los mismos comunarios. Sembraron Kauchi en suelos salino/sódicos y altamente salino sódicos como forraje para el ganado.

Portugal & Alzerecca (1992) compararon 3 sistemas de siembra de kauchi, con una densidad de siembra de 5.5 kg/ha y una fecha de siembra tardía (20, 22 de diciembre 1997 y 10 de enero 1988). Con rastra de doble cuerpo y siembra al voleo se obtuvo una mayor germinación que en

surcos (distanciados de 1.50 m) y en pozos (1.50 m entre líneas y 1 m entre hoyos) pero el tratamiento con surcos superó los otros dos en número de plantas prendidas. En la zona, de acuerdo a la recopilación de información, el kauchi es sembrado en zanjas cruzadas y paralelas con un arado de disco trabajando a una profundidad de 13 a 18 cm y con una distancia entre zanjas de 4 a 5 m. Este manejo se adecúa al uso de suelos salino-sódicos por el incremento de la captación del agua proveniente de la precipitación a través del agua de escorrentía y el desplazamiento del exceso de sales fuera de la zona radicular.

Sin embargo, se constató un aumento del PSI y un bajo poder germinativo de las semillas. La labranza manual es muy difícil en los suelos de la región que presentan texturas limosa a arcillosa con horizontes superiores compactados y densidades aparentes de 1.5 g/cc. En estos suelos ni un tractor mediano llega a penetrar completamente con su arado de disco, resultando necesario un tractor grande, con una potencia de más de 70 HP aproximadamente.

La preparación del terreno de octubre a noviembre, antes de la época de lluvias para captar agua, debe dejar una distancia entre zanjas de 2 a 4 m para optimizar la captación del agua. Luego del arado se debe practicar el desterronado. Para aumentar el porcentaje de germinación y prendimiento, se realiza el pelado de los sépalos de las flores de kauchi que forman la cápsula que cubre a las semillas. Se planificó la siembra para el mes de noviembre o principios de diciembre para asegurar la germinación y el prendimiento de las semillas. La resiembra y el trasplante se repetirán como labores de cultivo para poblar las áreas descubiertas, hasta el completo establecimiento del kauchi.

Se propuso además aprovechar el primer año de la preparación del terreno mediante la siembra asociada del kauchi con quinua, técnica actualmente utilizada por los campesinos del lugar. Para la implantación de especies perennes como lo es la alfalfa y en algunos casos el kauchi, la siembra asociada sirve durante el primer año para proteger los cultivos de los riesgos de helada y granizada. La producción de quinua se aprovechará para compensar los gastos de instalación del kauchi. El costo de instalación de una hectárea de kauchi es de 315 Bolivianos (cuadro 5.10).

Cuadro 5.10. Costo de producción por hectarea de kauchi (*Suaeda foliosa*) en Bs.

Detalle	Costo unitario Bs.	Cantidad	Costo Bs./Ha
Zanjado	60 Bs./hora	1.5 hora	90
Semilla	45 Bs./arroba	1 arroba	45
Mano de obra (Desterronado, Siembra)	10 Bs./día	18 días	180
TOTAL			315

Resultados

En los dos años del Proyecto se logro roturar y sembrar una superficie de 1708 has (4.76% de las areas marginales), con una roturación por familia de 3 a 4 hrs. y 2.7 has para el primer año, utilizándose para tal efecto 217 qq entre semilla recolectada y adquirida (cuadro 5.11).

Cuadro 5.11. Superficie roturada en la segunda seccion

	Roturación Por familia (Hrs.)	Roturación Total (Hrs.)	Superficie por familia (Has.)	Superficie total (Has.)
1er año	4	1040	2.74	687.74
2do año	2.72	1030.47	2.7	1020.16
TOTAL				1707.90

Se puede apreciar en el cuadro 5.11 que el primer año del proyecto la densidad de siembra fue de 13.69 lb/hr; menos de la mitad que el segundo año (33.3 lb/hr). Este incremento se debe a que se efectivizó el uso del tractor en la roturación y posterior siembra del kauchi en las parcelas seleccionadas, pero sin lograr con ello un mejor establecimiento. Las pérdidas se deben principalmente al bajo poder germinativo y a la excesiva agua acumulada en la época de lluvias.

Cuadro 5.12. Siembra y prendimiento de kauchi

	Densidad Siembra (Lb/Hr)	Establecimiento (%)	Perdida (%)
1 ^{er} año	13.69	31.92	5
2do año	33.3	23.63	27

Se logró un porcentaje de cobertura vegetal de 49.2 % en las parcelas habilitadas para el kauchi, produciéndose con un rendimiento por metro lineal cubierto de 1.05 kg, un total de 1289.04 kg/ha de materia verde. Se estima que un kauchial puede soportar una carga animal estimada para unidades ovinas de 25 kg de peso promedio a 12.6 UO por hectárea y por año.

5.3.3. Sucesiones de cultivos adaptados a la salinidad (D. Hervé)

Finalmente, la propuesta de recuperar áreas marginales para su siembra con kauchi es aceptada y difundida por los comunarios. En primer lugar podría ser extendida a la resiembra de otras halófitas forrajeras nativas. Tejada & Guzman (1993) experimentaron en la localidad de Cocaraya (provincia de Quiacollo, Cochabamba) la instalación de varias especies de *Atriplex*: *Semibaccata* R. Brown, de hábito rastrero, una de las 11 especies colectadas en el Herbario Nacional de Bolivia, *Halimus*, de hábito erecto originaria de Tunez (Africa), así como *Nummularia* importada de Chile, *Cordobensis* de Argentina, *Canescens* y *Polycarpa* de Utah (USA). Tomando en cuenta que la producción de los *Atriplex* puede alcanzar 20 kgMS/ha/año, el contenido en proteína cruda 11% y la alta digestibilidad del forraje foliar, convendría seguir mejorando los sistemas de siembra y probar tal vez especies de *Atriplex* mejor adaptadas a suelos de textura fina.

En segundo lugar, la siembra de kauchi podría ser incorporada a la sucesión de cultivos, después de un primer cultivo de quinua o cebada, por su mayor resistencia a la salinidad. Los cultivos más frecuentes en la rotación de cultivos son la papa, la quinua, la cebada y la haba. En general, la papa viene en cabeza de rotación. Su cultivo en suelos salinos está condicionado por su nivel de tolerancia a la sal.

Estudios en macetas con 4 concentraciones de sal ($0.13 \text{ mmhos cm}^{-1}$ para el testigo, 1.60, 1.74 y $2.03 \text{ mmhos cm}^{-1}$), realizados por Rocha & Orsag (1992), demostraron que la papa amarga es más tolerante a la sal que la papa dulce. Se midió el potencial foliar de equilibrio, y el potencial foliar mínimo con una bomba de Scholander, y la resistencia somática con porómetro. Los potenciales foliares de equilibrio (potencial hídrico medido al alba, que corresponde al potencial hídrico medio del suelo explorado por las raíces) aumentan a medida que aumenta el contenido en sales, porque la fuerza de extracción de agua por las plantas es mayor. Aumenta también el contenido de sodio en el área foliar. La variedad Alpha presenta una pérdida de rendimiento de 78-90% (10.83 t/ha), Sani Emilla (*Solanum tuberosum* ssp *andigenum*) de 30 a 62% (3.14 t/ha) y Luki (*Solanum juzepczukii*) de 30 a 44% (3.32 t/ha).

Si bien existen referencias internacionales sobre la tolerancia de cultivares de cebada y de haba, no se dispone para estos cultivos de resultados experimentales en las condiciones del altiplano boliviano. La situación es distinta para el cultivo de quinua que se ha beneficiado, como lo hemos visto, de investigaciones sobre su tolerancia a sales. Según el contenido del suelos en sales, se puede cultivar la quinua un solo año o antes de un cultivo forrajero o después de un cultivo de papa.

5.4. Manejo del agua de riego

5.4.1. Fuentes de agua y técnicas de riego (R. Ledezma)

5.4.1.1. Fuentes de agua de riego

Riego mediante canales a partir del río Desaguadero

La fuente principal de agua es el río Desaguadero y el riego por gravedad, a partir de canales, es el más practicado.

Los campesinos del Altiplano Central tienen que enfrentar períodos alternativos de sequía con frecuentes heladas, que han sido muy severas durante las últimas décadas. En la Provincia Villarroel, la precipitación promedio anual alcanza a 380 mm, concentrada de diciembre a marzo, y la evaporación potencial anual es de 1,5 m. Las necesidades de agua de los cultivos no son satisfechas, inclusive el abastecimiento para consumo no se puede garantizar y la falta de agua es una de las principales limitaciones para el desarrollo socioeconómico.

En esta provincia, los campesinos empezaron hace 38 años el riego a partir de río Desaguadero que constituye la única fuente permanente de agua superficial del lugar y disponible sin costo. El canal de riego de la comunidad Santa Ana funciona desde 1963. Las primeras experiencias de riego campesino fueron inspiradas del riego observado en Chile por los mismos campesinos, en sus migraciones temporales. Regaron cultivos forrajeros, alfalfa en primer lugar, para alimentar el ganado.

El riego con aguas del río Desaguadero, dependiendo de las condiciones del suelo y del tipo de manejo, puede constituirse en una forma de habilitación de suelos, para el cultivo de especies tolerantes a los niveles de salinidad. La evaluación de los riesgos de uso de aguas en los suelos de la zona baja de la provincia Villarroel no puede realizarse independientemente de las condiciones fisicoquímicas de los suelos, de la distribución textural en sus perfiles, del manejo del agua y del cultivo a regar (Ledezma, 1995).

La red de canales en la zona de Chilahuala (margen derecha) se presenta en el mapa de la figura 5.21 y las características de los canales en el cuadro 5.13. Los caudales son bastante significativos, entre 13 y 75 litros por segundo, para uno a dos riegos por mes, cada uno por una duración de 6 a 24 horas, según los sistemas de riego.

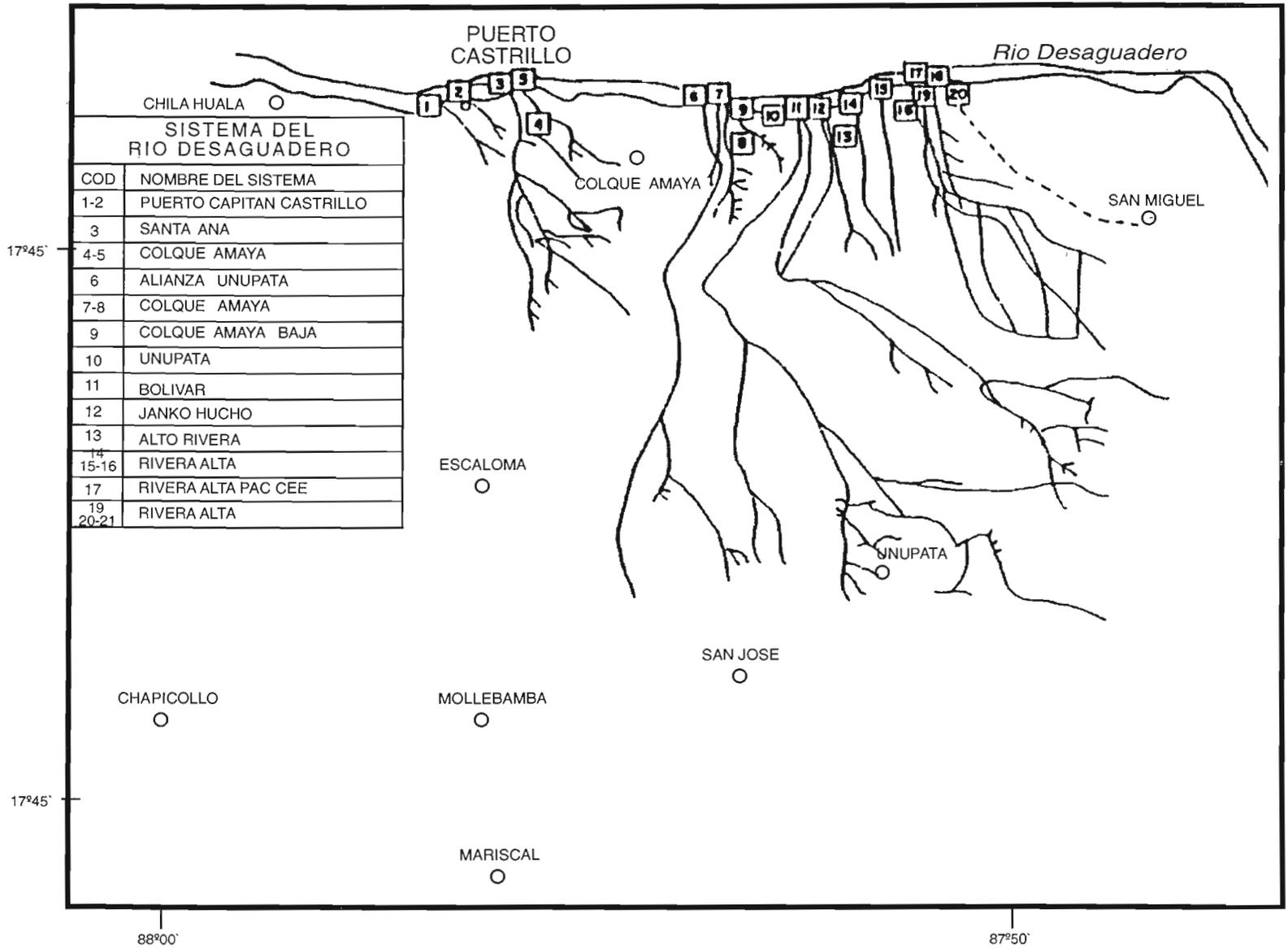


Figura 5.21. Ubicación de los canales de riego en la zona de Chihuala, margen derecha del rio Desaguadero (Ledezma, 1995)

En 1989, tres comunidades solicitaron sistemas de riego al Programa de autodesarrollo campesino PACII (Comunidad europea - Cordepaz): Alta Rivera, Rivera Alta y Rivera Baja, para un total de 9,500 has (PAC, 1990). Pero la implementación del proyecto ha sido diseñada para Alta Rivera (2,200 has). Los canales de riego existentes son excavados perpendicularmente al Río Desaguadero, con toma de tierra cerrada o no con compuerta metálica, ubicada a 50-100 m fuera del cauce del río, a partir de canales de derivación que son destruidos durante las crecidas del río. Tienen una pendiente longitudinal mínima y la velocidad del agua no excede 30 cm.s^{-1} .

Cuadro 5.13. Sistemas de riego comunal en G. Villaroel (Ledezma & Rocabado)

NF = No funciona

Nota: la cifra entre paréntesis corresponde a la numerotación de canales de Fig. 5.21

Sistemas	N° canales (N° mapa), km	Afiliados	Q=l/s	Frec/mes	Tiempo Irrigación (h)
Manquiri- Paxicala	1	Manquiri10 Paxicala 27	NF	1	24
Achaviri	1	40	NF	1	24
Pto. Cap. Castrillo	(1), 1.5 km (2), 2 km	50	34 45	1-2	24
Laimini	1	30	46	2	12
Colque Amaya Alta	(4), 3 km (5), 3 km (7), 3 km	60	48	1	24
Santa Ana	(3), 2.6 km 1 principal 5 ramales	56	75	1-3	24
Colque Amaya Baja	(8), 4 km (9), 3 km	84	16 y 13	1	12

Sistemas	N° canales (N° mapa), km	Afiliados	Q=l/s	Frec/mes	Tiempo Irrigación (h)
Alta Rivera	(14), (15) (16) PACII	47	25	1-2	12
Centro- Rivera Alta	(17)	Centro 40 Alta 20	NF	1-2	6
Rivera baja	1	20	NF	2	6
Alianza Unupata	(6), 12 km 1 principal 3 ramales	64	NF	1	12
Bolívar	(11), 13 km 1 principal 2 ramales	55	NF	1-2	12
Jank'o Huicho	(12), 19 km 1 principal 3 ramales	45	NF	1-2	12
Unupata- Laruta- Unión Tolar	(10), 23 km 1 principal 4 ramales	Unupata 45 Lovera 25 Tolar 15 Laruta 20	NF	1	8

Los sistemas de riego tradicional existentes en las provincias Gualberto Villarroel y Aroma de La Paz se diferencian del sistema de riego El Choro, en la medida que cada uno tiene su toma principal y sus canales respectivos, y por consecuencia, su propia organización. Las tomas y canales de riego a nivel primario, secundario y terciario son rústicos y poco estables ya que se utiliza solo material local (tierra y vegetación) por consiguiente es necesario adecuarlos y limpiarlos cada año. Actualmente 8 sistemas de riego se encuentran abandonados en G. Villarroel debido a la escasez de agua y falta de mano de obra para habilitarlos después que fueron deteriorados por derrumbes, colmatación de los canales y destrucción de las tomas por las avenidas (Cuadro 5.13).



Foto 5.8. Toma de canal de riego (Ledezma, 1995)

La longitud de los canales es muy variable, entre 7 y 23 km de longitud, que han sido abiertos con herramientas manuales. Estos sistemas de riego usan canales de tierra para un riego suplementario antes de la época de lluvias, y se cierran las tomas durante la época de lluvia por el peligro de inundaciones. La obra de toma, también de tierra, depende del cambio del cauce del río, obligando a un nuevo trabajo en cada gestión para limpiar el sedimento acumulado en la entrada del canal (Foto 5.8). Así la construcción de compuertas reguladoras no resultó en algunos años anteriores por que no duraron mucho o no se usaron debido a la excesiva cantidad de sedimento que se acumula en los canales. Debido a que el río está muy lejos de algunas comunidades, existen acuerdos entre estas para que el canal pase por las comunidades más cercanas al río, hasta llegar a la comunidad que utilizara el agua. Estos acuerdos contemplan desde aportes de la comunidad regante hasta las comunidades afectadas en materiales de construcción para las escuelas, dinero en efectivo, turnos de riego para las personas que vieron afectados sus terrenos.

Rocabado (1999) ha estudiado más en detalle la organización comunal del riego, cuyas reglas de distribución son igualitarias en todos los sistemas de riego de la provincia: cada regante posee un turno de riego, con un caudal y un tiempo determinados y dependientes de la cantidad de agua y del número de usuarios que tenga el canal. Esta asignación se hace por lista donde el primer servido es el que se encuentra más alejado de la toma. La distribución del agua es supervisada por los alcaldes según el número de laterales (PAC, 1990). Para recibir el turno, el usuario bloquea el canal principal, o el lateral, y procede al riego con todo el caudal del canal, por inundación, con una lamina de 10 a 15 cm. El turno no alcanza en general para regar más de 0.25 a 0.5 has.

Las comunidades que abren un canal de riego deben registrarse en el PRONAR, Programa Nacional de Riego, para obtener su respectivo permiso. Esta institución designa un inspector para que realice un seguimiento de los sistemas de riego. Cada canal de riego tiene un o dos encargados (Alcalde de riego), responsables de repartir y controlar el agua entre los afiliados, coordinando los turnos entre zonas y entre comunidades dependiendo de un mismo sistema de riego, y controlando la asistencia en las labores de mantenimiento del canal, para castigar a los faltantes. La primera limpieza es la apertura del canal en julio o agosto a la cual todos los afiliados tienen que participar con 2 a 10 metros lineales al día. Las posteriores limpiezas son de 2 a 4 por año, dependiendo de la cantidad de sedimento que se acumula en el canal cuando el caudal de agua disminuye. Durante las crecidas, los usuarios bloquean la toma del canal primario para evitar daños en el sistema; no se puede regar (PAC, 1990).

Bombeo de agua subterránea mediante pozos

Las aguas subterráneas se constituyen en alternativas de fuente de agua para el riego en función de su calidad y de los costos de producción que implican su extracción por bombeo. Hemos visto que mediante una prospección geoelectrica se podía evaluar el espesor del acuífero y delimitar las zonas de agua con diferentes salinidades.

Desde el año 1983, YUNTA ha perforado en la provincia G. Villarroel muchos pozos para riego de forrajes con capacidades de hasta 10 has y para cultivos de hortalizas en campo abierto de hasta 1 ha. Además, los pozos abastecen de agua para el consumo humano (con la instalación de bombas manuales que principalmente son de tipo Wara y Remadora) y para el riego a pequeña escala especialmente dirigida a la producción de hortalizas en carpas solares. Los pozos tienen dos tipos de usuarios, familiares, con perforaciones de poca profundidad y multifamiliares, con mayor profundidad, que benefician a tres o cuatro familias por pozo.

En las áreas donde al agua del río Desaguadero no llega por gravedad, se ejecuto entre los años 1989 y 1998 ocho sistemas de micro riego con aguas subterráneas que sirven para el cultivo de alfalfa y cebada. Estos ofertan entre 4 y 18 l/s, 8 hr/día y tienen una capacidad de regar 2 a 6 ha. Las perforaciones se iniciaron con equipos de perforación manual, luego pequeñas perforadoras Hidra Drill, hasta llegar a contar en la actualidad con equipos de perforación a rotación de Iodos. Los costos de inversión son de aproximadamente 1500 US\$ por ha que es relacionado al costo de perforación del pozo y de la compra de la bomba con motor.

Hasta el momento se tiene perforados 24 pozos con una profundidad promedio de 40 mts. y un caudal aproximado de 8 lts/seg., para riego tanto por inundación como por aspersión. El riego de 1 ha de alfalfa se realiza en 20 a 24 hr, unas 6 veces por año. El método de riego parcelario practicado es por superficie en tablones con áreas de 500 a 750 m², con eficiencias de almacenamiento y uniformidad de distribución bajas. La lámina aplicada en cada riego varia entre 7 y 12 cm. Actualmente se práctica también el método de riego por aspersión en alfalfa y cebada, lo que incrementa mucho las eficiencias de aplicación.

Cuadro 5.14. Pozos perforados hasta 1998 en la provincia G. Villarroel (Yunta, 1998)

Sección Villarroel	No. Pozos	Profundidad Promedio (mts)	Profundidad Total (mts)	%
Primera Sección	176	40,83	4 940,00	19,35
Segunda Sección	471	20,52	9 666,50	37,87
Otros lugares	273		10 920,00	42,78
Total	920		25 526,50	100,00

El cuadro 5.14 muestra los resultados alcanzados, tanto en el área de intervención institucional como es la provincia Gualberto Villarroel así como en otras regiones a través de contratos con instituciones. Los pozos perforados en el área de intervención institucional de Yunta, 176 en la Primera Sección San Pedro de Curahuara y 471 en la Segunda Sección Papel Pampa, significan aproximadamente 14.606,50 metros de perforación. También se han efectuado otras 273 perforaciones con el financiamiento de nueve instituciones entre las que se encuentran organizaciones no gubernamentales nacionales e internacionales, Alcaldías Municipales y otras.

Microriegos de forrajes y hortalizas

El modelo de simulación de Pratz (1994) permitió de ubicar pozos en el acuífero de la provincia Villaroel. Con el mismo, se simuló el aprovechamiento de 100 micro riegos de cuatro hectáreas cada uno, con un caudal de 10 l/s. Estos micro riegos pilotos han sido diseñados para grupos de 4 personas, formados en forma voluntaria en cada comunidad.

El cuadro 5.15 indica los sistemas de micro riego implementados y el cuadro 5.16 las superficies y producciones de los cultivos sembrados en micro riego. Como se puede advertir en el cuadro 5.16, se manifiesta un incremento de aproximadamente 4% en la superficie total cultivada con micro riegos entre las dos gestiones señaladas. Asimismo, se observa una predominancia del cultivo de forraje (alfalfa y cebada) con respecto a las hortalizas y una siembra incipiente de cultivos anuales. La superficie total destinada al cultivo de forraje fue de 16,4 has en la gestión 97/98 y 15,83 has en la última gestión 98/99. La superficie de alfalfa tuvo un incremento del 5,45% y la disminución se observa en la superficie de cebada que bajó en 21,73%.

Cuadro 5.15. Sistemas de micro riego (Yunta, 1998)

COMUNIDAD	MICRORIEGO	Nº SOCIOS
Villa Palca	Tupa	3
Villa Palca	Villca – Tupa	3
San José Alto	Figueredo	3
San José Alto	Figueredo Fernández	3
Escalona	Herrera	3
Escalona	Arellano	4
Anathola	Blanco	4
Mariscal Santa Cruz	Cruz	4
TOTAL		27

Cuadro 5.16. Cultivos en micro riego (Yunta, 1998)

CULTIVO	1997/1998			1998/99
	Superficie m_	Rendimiento Kg.m ⁻²	Producción Kg	Superficie m_
Cebolla	3747,56	3,73	14329,77	7128
Ajo	547,58	2,12	1162,12	
Zanahoria	544,40	4,35	2368,95	2240
Haba	8,70		0	790
Alfalfa (MV/ha)	110 000	1,90	209000	116000
Cebada	54 000	0,13	7200	42267
Papa	25,38	0,55	14,01	6988
Arveja				134
Total	168873,6	12,79	234074,85	175547

Las organizaciones de los sistemas de riego están conformadas por 3 a 34 usuarios, representados por un comité de riego, quienes coordinan la gestión del sistema. Se ha notado que los sistemas operan en mayor grado cuando existe una propiedad individual dentro el sistema, que significa realizar trabajos y obtener beneficios con su propio sacrificio. Para pertenecer al sistema de microriego, el comunario que en forma voluntaria accede a este sistema, debe cumplir con algunos requisitos: (1) aportar con 1 hectárea de terreno cultivable próximo a un domicilio, que no sea afectado por las sales; (2) tener disponibilidad económica para la operación y el mantenimiento del sistema.

El responsable de los sistemas de micro riego debe cumplir las siguientes funciones:

- Planificar la producción de hortalizas de la gestión agrícola y la provisión de semillas para la siembra.
- Organizar el mantenimiento del motor (aceite, filtro, bujía, etc..)

- Planificar el riego anual; cada socio tiene “turnos de riego” y utiliza el motor de acuerdo a una frecuencia de cada 3 días para el riego de hortalizas y cada 15 días para el riego de forrajes.
- Llevar el registro de uso del motor y vigilar que todas las tuberías, mangueras y accesorios durante y después del riego sean débilmente mantenidos para evitar deterioros.

Pozos de agua potable para consumo doméstico y carpas solares

Uno de los logros de la intervención de YUNTA en la Provincia Gualberto Villarroel es la implementación de pozos para agua potable, cerca de las casas de los usuarios. Son utilizados para consumo doméstico (preparación de comidas, aseo, etc.) y también para riego a pequeña escala de las carpas solares donde se producen hortalizas que mayormente son para consumo propio (Cuadro 5.18). Algunos también utilizan esta agua para el ganado bovino y ovino.

Este programa de carpas solares fue iniciado casi paralelamente a la perforación de pozos para aprovechar de manera óptima estos recursos hídricos subterráneos. La construcción de ambientes atemperados para el cultivo de hortalizas orientadas al autoconsumo se fue constituyendo en una de las importantes líneas de intervención institucional. Hasta la gestión 1998, se manejo un promedio de 38 carpas por año, con un total de 307 carpas solares ubicadas en 22 comunidades de la Segunda Sección de la provincia. La relación cronológica de las carpas construidas muestra un comportamiento cíclico de acuerdo a los proyectos ejecutados y una cantidad creciente de construcciones en los últimos años (Cuadro 5.17).

Cuadro 5.17. Carpas solares (Yunta, 1998)

GESTION	No. Carpas	m_
1991	40	1480
1992	36	1332
1993	13	481
1994	5	185
1995	55	2035
1996	0	0
1997	71	2627
1998	87	3219
TOTAL	307	11359

Cuadro 5.18. Rendimiento de cultivos en carpas solares (por años, en kg/m₂)

	CULTIVO	93/94	94/95	95/96	96/97	97/98	Promedio
1	Tomate	5,98	8,04	7,09	8,65	8,12	7,58
2	Pepino	4,93	5,49	5,31	7,85	8,77	6,47
3	Sandía	3,68	7,85	6,95	6,83	7,92	6,65
4	Lechuga	6,36	6,73	6,81	8,26	6,03	6,84
5	Zanahoria	5,23	2,95				4,09
6	Pimentón	8,50	10,00	7,35	15,60		10,36
7	Ají	4,00					4,00
8	Beterraga	2,47	4,80	4,87	7,56	4,85	4,91
9	Zapallo	4,42	17,50	16,95	4,36		10,81
10	Cebolla	3,08	1,70				2,39
11	Orégano	0,33					0,33
12	Papa	0,80	6,10				3,45
13	Acelga	3,96				3,11	3,54
14	Repollo	7,06					7,06
15	Melón	5,69				12,78	9,24
16	Poroto	3,00					3,00
17	Rabanito					4,49	4,49
18	Calabacín					7,74	7,74

5.4.1.2. Técnicas de riego a la parcela

En la mayoría de los sistemas de riego tradicionales en la zona, se aplica una lámina de 15 a 20 mm de agua mediante una inundación no controlada, con una frecuencia de dos veces al año, y en años buenos, de tres veces hasta cuatro veces por año. Pero se constata una baja eficiencia del riego en suelos arenosos y una distribución no uniforme por la mala preparación del terreno y la falta de trabajo de nivelación en suelos arcillosos. En todo caso, el problema principal queda en la ausencia de drenaje. Este método de riego se utiliza para cultivos sembrados al voleo y en algunos casos en líneas como la alfalfa y la cebada. Se tuvo referencia de una parcela de 3692 m², de textura FA a FY-Y, que se regaba cada 15 a 20 días, con un turno de 6 horas y un caudal de 13.6 a 14.8 l/s.

El riego por surcos en camellones es muy practicado para cultivos asociados, sembrados al voleo: haba con quinua, quinua con cebada, haba con quinua y cebada e incluso quinua y alfalfa. Los camellones tienen 1.50 m de ancho. Uno de los problemas es la deficiente nivelación de los surcos que perjudica el avance del agua. El caudal permitido es solo de 5 l/s, con una frecuencia de riego cada 15 a 30 días, y un turno de 3 horas aproximadamente.



Fotos 5.9. (Ledezma)
Arriba: riego por inundación.
Abajo: riego en camellones.

5.4.2. Impactos del riego

5.4.2.1. Consecuencias pedoquímicas de la irrigación de suelos en Chockonimaya (Aroma)

(M. Flores)

Introducción

La irrigación en regiones áridas y semi-áridas representa un peligro para la salinización y/o sodificación de los suelos más aún si las aguas, como en el caso del río Desaguadero, contienen cantidades elevadas de sodio. Las condiciones de fuerte evaporación que reinan en la zona, los vientos secos, la proximidad de la napa freática y el drenaje lento han propiciado una acumulación de sales en el perfil y que por ascensión capilar se depositan en superficie durante el periodo seco del año (invierno).

Las diferentes prácticas de manejo que realiza el agricultor pueden incrementar los problemas de salinización y/o sodificación. El objetivo del presente estudio es cuantificar esta degradación del suelo, determinando cuál es el efecto y las consecuencias pedoquímicas de la irrigación de suelos con aguas del río Desaguadero. Fue realizado en la región de Choconimaya (provincia Aroma, Departamento de La Paz) entre agosto de 1993 y septiembre de 1994. Se compara para ello parcelas a secano y bajo riego con cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*).

Materiales y métodos

Para caracterizar el tipo de manejo se aplicó una encuesta de campo incluyendo las técnicas de cultivo y prácticas de irrigación, análisis de suelos y salinidad, y observaciones agronómicas del cultivo de alfalfa. Se aplicaron estas encuestas a 14 agricultores y se observó parcelas cultivadas con alfalfa, 7 irrigadas desde hace 10 años (a la fecha del trabajo en agosto 1993) y 7 a secano, cultivadas entre 10 y 20 años. Se tomaron muestras de suelo de todas las parcelas cada 20 cm hasta una profundidad de 60 cm. De acuerdo a la textura de campo las parcelas fueron agrupadas en tres grupos y se describió un perfil de suelo por grupo de parcelas. Se tomaron muestras de agua en tres puntos del canal principal de riego para su posterior análisis.

En el laboratorio de la Unidad de Ciencias del Suelo de la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica), se determinaron los siguientes parámetros:

pH con acetato de amonio y dosados separadamente por absorción atómica) y solubles (extraídos con agua previa agitación y centrifugación en una relación 1:2 y dosados por absorción atómica); capacidad de intercambio catiónico (CIC a pH 7 por destilación); HCO₃ y CO₃; porcentaje de carbono y materia orgánica. Se calcularon parámetros como el ESP, SAR y RSC.

Se aplicó un modelo fijo de ANOVA a dos factores con el objetivo de probar estadísticamente el efecto del uso de riego sobre diferentes variables pedoquímicas:

* Factor A (riego): parcelas bajo riego; parcelas a secano

* Factor B (profundidad): 0-20; 20-40; 40-60 cm.

En caso de una interacción significativa, se aplicó adicionalmente un Test Tukey (Neter *et al.*, 1990; Gerard, 1992) para precisar si las diferencias eran significativas a un nivel de 0.05 y 0.01.

Resultados y discusión

Los agricultores utilizan el riego desde inicios de la década del 80 y se organizan por turnos aprovechando al máximo la cantidad de agua disponible. El riego es por “inundación” y no es controlado. El abono orgánico se incorpora en muy poca cantidad y de forma superficial. Este aspecto aumenta los efectos desfavorables como la dispersión de coloides y la disminución del drenaje del suelo causado por la predominancia del Na intercambiable.

Los suelos presentan un perfil poco diferenciado del tipo AC ó A(B)C con pequeños nódulos de sal (Calcaric Regosol y Sodic Solonchack respectivamente, FAO, 1988). El porcentaje de M.O. es menor a 1.1% . La capa freática se encuentra entre los 1,40 m (parcelas con riego) y 2,30 m (parcelas a secano).

El canal principal de riego tiene una extensión de más o menos 26 km de Oeste a Este. El ancho varía entre 1.40 m y 2.20 m, la profundidad entre 0.20 y 0.40 m. El agua puede ser clasificada como del tipo C3S2 según el diagrama de clasificación de aguas de U.S. Salinity Laboratory Staff de 1954. C3 representa un elevado peligro de salinidad y S2 un riesgo moderado de sodicidad. El

riesgo de salinidad y de sodicidad causado por agua de riego es más acentuado en suelos de textura fina y drenaje deficiente (Bresler *et al.*, 1982).

Se presentan en el cuadro 5.19 los valores mayores y menores de los parámetros medidos en los dos grupos de parcelas, con y sin riego continuo.

Cuadro 5.19. Resumen del análisis de suelo a tres profundidades

(0-20 cm = 20; 20-40 cm = 40; 40-60 cm = 60), en 7 parcelas a secano y 7 parcelas bajo riego (M = valor mayor, m = valor menor)

	PH	pH	CE	Cationes intercambiables				ESP	SAR	Cationes solubles				
	(agua 1:5)	(KCl 1:5)	(1:5) dm ⁻¹	(1:5) Ca	(1:5) Mg	(1:5) K	(1:5) Na			(1:2) Ca?	(1:2) Mg?	(1:2) K?	(1:2) Na?	(1:2) SAR?
Seco														
M 20	8.90	7.80	1.7	26.00	4.53	1.48	4.76	15.03	3.06	0.58	0.16	3.37	5.58	
m 20	8.24	7.49	0.09	12.80	1.72	0.47	0.21	0.86	0.15	0.04	0.019	0.024	0.15	
M 40	9.02	7.93	2.1	28.80	6.58	2.06	8.95	24.98	4.25	0.10	0.083	3.60	5.27	
m 40	8.24	6.76	0.06	12.35	1.48	0.21	0.32	0.57	0.12	0.05	0.017	0.017	0.48	
M 60	9.24	8.13	1.2	25.90	5.76	1.91	4.0	16.14	3.05	0.59	0.081	2.95	5.05	
m 60	8.25	6.75	0.08	14.15	1.68	0.21	0.43	1.13	0.084	0.092	0.012	0.087	0.41	
Riego														
M 20	8.63	7.04	1.8	9.11	3.67	3.10	3.00	24.33	2.70	5.48	2.96	4.56	3.27	
m 20	7.30	6.35	0.2	4.20	2.13	1.20	1.20	12.90	0.52	1.18	0.64	1.34	1.30	
M 40	9.76	8.00	2.2	42.40	7.61	3.16	8.31	38.42	8.31	4.08	2.88	17.13	6.88	
m 40	7.72	6.56	0.2	5.30	2.56	1.79	2.91	12.63	0.42	0.49	0.30	1.39	1.05	
M 60	9.67	8.22	1.8	46.10	5.21	4.10	10.38	20.48	18.23	9.72	4.68	13.21	20.85	
m 60	8.25	7.50	0.2	8.40	3.69	1.60	2.45	9.92	0.42	0.010	0.33	2.47	3.58	

El efecto de la irrigación no es significativo sobre el pH del suelo. La variación del pH es debida al factor profundidad. El aumento del pH en profundidad en las parcelas irrigadas se debe al aporte de cationes metálicos por las aguas de riego. El efecto de la irrigación es muy significativo sobre la conductividad eléctrica y la CE es más alta a una **profundidad** entre 20 y 40 cm, debido a una mayor concentración de cationes metálicos solubles **con relación** a la superficie y de ciertos aniones como HCO₃ aportados por las aguas de riego.

El análisis ha mostrado que hay una variación y acumulación del Ca intercambiable en algunas profundidades de las parcelas irrigadas, en cuanto es uniforme en las parcelas a secano. Esta acumulación es producto de la lixiviación causada por las aguas de riego y es una de las causas del aumento del pH. La difusión del Ca es altamente favorecida por el flujo hídrico y en suelos cultivados tiende a acumularse en la rizósfera (Bonneau y Souchier, 1979).

Igualmente para el Mg hay una variación y acumulación en profundidad (20-40 cm) en las parcelas irrigadas. Esto es debido al aporte de las aguas de riego y posiblemente a que este elemento es muy móvil en el perfil del suelo pudiendo ser lixiviado antes que el Ca. Esto también contribuye al aumento del pH.

El efecto de la irrigación es muy significativo sobre K intercambiable, llegando a triplicar la cantidad de K de las parcelas irrigadas con respecto a las en secano. Esto se debe a las elevadas cantidades de K que presenta el agua de riego (0.8 meq/l).

El sodio intercambiable representa entre 54 y 60% de la suma de cationes metálicos en el agua de riego. La existencia de una napa freática de carácter salino y las condiciones climáticas semi-áridas permiten la conservación del Na (Duchaufour, 1991). Esta napa sube bajo el efecto del riego y a causa de la falta de un drenaje eficiente. La evapotranspiración aumenta la concentración total de sales en el suelo desplazando los equilibrios de intercambio iónico hacia un aumento de la fijación de sodio. Adicionalmente, el Ca migra en profundidad cediendo su lugar al sodio en el complejo de intercambio. Las consecuencias son el aumento del ESP y la desestructuración de las partículas del suelo. Concentraciones mayores al 15% afectan la permeabilidad del suelo (Miller y Donahue, 1990). Como resultado puede ocurrir una peptización de las arcillas y la acumulación de las arcillas sódicas en el horizonte B (Solonetz).

El efecto de la irrigación sobre el ratio de adsorption (SAR) es muy significativo. A pesar de la existencia de un efecto muy significativo de la irrigación sobre el ESP y SAR no se ha encontrado una relación entre estos dos parámetros que permita realizar simulaciones de riego. Se ha encontrado mas bien elevadas desviaciones estándares.

El efecto de la irrigación no es significativo sobre el Ca soluble y es significativo sobre los cationes solubles K, Na y Mg. Posiblemente la diferencia de solubilidad se debe a que las sales carbonatadas y sulfatadas que forma el Ca son menos solubles que sus equivalentes magnesianas. Una segunda razón es que en la superficie el complejo de intercambio orgánico tiene una selectividad de adsorción mucho más importante por el Ca que por el Mg (Dufey, 1992). De esta forma, el Mg es más móvil y queda expuesto a solubilizarse antes que el Ca.

El efecto de la irrigación tiende a aumentar muy significativamente los aniones HCO_3 . Entretanto el efecto sobre los otros aniones (cloruros, sulfatos, etc.) no es significativo. El efecto de la irrigación no es significativo sobre el ratio sodio-carbonato (RSC), lo que demuestra que el agua es de buena calidad si consideramos estrictamente este parámetro.

Conclusiones y recomendaciones

Si bien las aguas de riego presentan un riesgo moderado de sodicidad, las parcelas bajo riego han mostrado contenidos de tres a cuatro veces mayor en Na con respecto a las parcelas a secano. Podemos observar una tendencia de los suelos salinos a convertirse en suelos alcalinos (Solonchak en Solonetz). Si se continúa con el uso de esta agua el ESP de los suelos tenderá a aumentar causando la desagregación y dispersión de las partículas, lixiviación de arcillas, disminución de la permeabilidad y toxicidad para las plantas.

El agua de riego aporta principalmente Na, Mg y K. El aumento de la CE podrá afectar la productividad relativa de las parcelas. Para la alfalfa, a cada aumento de $1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de la CE corresponde una disminución de 7.3% de la producción relativa (Bresler *et al.*, 1982). Bajo el punto de vista químico, los perfiles de las parcelas a secano son más homogéneos (menor variación en profundidad) que los de parcelas bajo riego.

Por un lado, es imposible que el agricultor no riego más con las aguas del río Desaguadero, debido a que este se constituye en la única fuente de agua próxima y de fácil acceso. Por otro lado, algunos pasos importantes pueden ser dados sobre todo por los organismos que trabajan en la región para minimizar los efectos de la irrigación sobre la salinidad de los suelos:

1. Sensibilizar a los agricultores sobre las causas y efectos de la salinidad de los suelos y capacitarlos en las prácticas de irrigación y drenaje.

2. Realizar un estudio detallado de la aptitud de los suelos a la irrigación con diferentes calidades de agua de riego.
3. Instalar una red de drenaje eficiente es ciertamente la condición esencial para el suceso de trabajos de desalinización y/o desodificación. Esta red de drenaje tendría una doble tarea: por una parte aseguraría el lavado de las sales acumuladas en el perfil de suelo y por otra parte, impediría la subida de la napa freática después de periodos intensos de irrigación.
4. Es imperativo calcular las necesidades de lavado de sales (LR) para conocer la cantidad de agua de riego que debe ser aplicada para evitar la acumulación de sales. Se debe buscar disminuir las dosis de riego y usar recursos hídricos de mejor calidad. Por lo general los valores de salinidad del agua de drenaje deben ser el doble de aquellos del suelo saturado.
5. Aplicar prácticas de manejo del suelo que mejoren su estructura y su permeabilidad y lo mantengan cubierto (incorporación superficial de guano y restos de cultivo, introducción de abonos verdes, inclusión de forrajeras en la rotación de cultivos, por ejemplo: alfalfa-cebada).
6. Implantar barreras cortaviento para disminuir la evaporación y proteger el suelo de la erosión eólica.
7. Utilizar yeso para luchar contra la sodificación. El yeso se puede esparcir sobre la superficie del suelo, incorporar o ser llevado por el agua de riego. En todos los casos es necesario calcular previamente las necesidades de yeso.

5.4.2.2. Impacto del riego sobre suelos y vegetación en Choro y Chilhuala (Provincia G.Villarroel) (V. Orsag, R. Miranda)

Introducción

Se estudia en detalle el efecto del riego sobre las características físico-químicas del suelo y sobre la vegetación en dos zonas de la llanura fluvio-lacustre: el sector Santa Ana del sistema de riego Chilhuala y el sector Japo del sistema de riego El Choro (Fig. 2.1). Se estudiará los efectos de las sales y de los metales pesados en el suelo y en la vegetación. Se compara la acumulación de sales o sodio en parcelas bajo riego, según el número de años de riego, con la de parcelas testigo, sin riego, en base a los siguientes parámetros: Conductividad eléctrica (CE) en la solución del suelo o en su extracto (CEe), porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) y pH.

Se ha tomado en cuenta estos parámetros en razón de que el aumento paulatino de sales en el suelo incide sobre el aumento de los valores de CE, tanto en solución como en su extracto. Por otro lado, cambios más profundos en el suelo relacionados a la alcalinización se deben al aumento paulatino del sodio intercambiable en el complejo adsorbente, gracias al intercambio del Na proveniente del agua de riego o de los horizontes inferiores por los cationes como el Ca y Mg retenidos por la arcilla o la materia orgánica. Este aumento del PSI incide no sólo sobre las propiedades físicas del suelo sino también sobre las químicas como el pH y en consecuencia, sobre los cultivos.

Para evaluar la concentración de metales en los suelos bajo diferentes años de riego, se ha visto por conveniente usar los parámetros propuestos para metales en el suelo : Rango Común y Máximos tolerables (Kloque, 1980); Concentraciones totales críticas (Rams & Steines, 1994) y los parámetros de la Unión Europea (Concentración crítica), en vista de la falta de valores de referencia para las condiciones bolivianas. En el caso de los metales, se ha evaluado en el suelo las concentraciones normales, propuestas por Chapman y Prat (1973) para algunos metales como el arsénico, molibdeno, cobalto y cobre, mientras que para el resto (plomo, cromo, cadmio, plata, níquel, mercurio, etc.) no se tiene parámetros para su comparación.

Conforme a la metodología usada por diferentes autores (Dinchev 1972, Yagodin 1982, Huang 1999) se evaluó también la presencia de metales en algunos tipos de vegetación nativa e introducida que se desarrollan en parcelas regadas: Chiji (*Distichlis húmulus*) que crece tanto en suelos a secano como en las parcelas bajo diferentes años de riego y por otro lado la alfalfa (*Medicago sativa*), cultivo más difundido sólo bajo riego.

Características físico-químicas generales de los suelos

Sector Santa Ana (Chilahuala)

Los suelos del sistema de riego Santa Ana presentan diferentes grados de evolución debido a su ubicación en el paisaje y tienen texturas variadas debido a su origen. En la zona Patorini (A), se tienen suelos franco a franco arcillosos; en la zona Colque Amaya (B), franco arcillo limosos; en la zona Zambrana, son franco arcillo arenosos (C) y arcillosos (D). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) en general es moderada y sólo en algunos casos baja, debido al predominio de

partículas gruesas, mientras que el total de bases intercambiables (TBI) fluctúa entre valores moderados a muy altos. En ese sentido los cationes intercambiables presentan también contenidos diferentes, así el Ca y Mg tienen concentraciones desde bajas a altas, el K desde altas a muy altas y el sodio desde bajas a muy altas (especialmente en el subsuelo). La saturación de bases en el sector es alta debido al predominio de los cationes bivalentes y monovalentes en el complejo de cambio y a la escasa acidez intercambiable (H, Al, Fe).

Los contenidos de materia orgánica en general son desde moderados a altos en la capa superficial, lo que contribuye a fijar los metales pesados. Mientras el contenido de fósforo fluctúa entre valores bajos a altos.

Sector Japo (El Choro)

Los suelos del sector de Japo, al igual que el resto de los suelos de la llanura, son jóvenes y con diferente grado de evolución. La textura de los suelos es variada aún en una misma zona, situación que dificulta la evaluación de la salinización de los suelos. En la zona A (Lastaca) varían de arcillosos (testigo) a arcillo limosos y franco arcillo limoso (parcelas bajo riego). Este aumento de material fino (limo) en las parcelas bajo riego podría deberse a su aporte con las aguas de riego. La zona B (Lastaca) presenta suelos de textura franco limosa (testigo) a franco arcillo limosa (bajo riego). En la zona C (Temple Jahuirá) son franco arcillosos (testigo) y franco arcillo limosos (parcelas bajo riego), mientras que en la zona D (Janko Pata) son arcillosos.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) varía de moderada (zonas A, B, y C) a alta (D) por su mayor contenido en arcilla, mientras que el total de bases intercambiables varía de alto a muy alto. Los cationes intercambiables como el calcio y magnesio fluctúan desde moderados a muy altos, mientras que el potasio y sodio desde altos a muy altos. El grado de saturación con bases es muy alto como en la mayor parte de los suelos del Altiplano. La materia orgánica varía desde contenidos moderados a altos, para todas las zonas existe mayor contenido de materia orgánica en las parcelas sin riego (testigos) que las bajo riego. El fósforo disponible tiene contenidos que varían desde adecuados a muy altos.

Impacto del riego sobre la salinización y alcalinización de los suelos

Calidad del agua del río Desaguadero

El río Desaguadero, que es la principal fuente de agua para los Sistemas de Riego tradicional de las provincias Aroma y G. Villarroel del Dpto. de La Paz y Cercado de Oruro, presenta un claro déficit de agua en la época seca del año. La calidad de sus aguas está estrechamente relacionada con la variación de los caudales debido a los procesos de dilución y concentración que sufren las sales durante el año.

En base a la aplicación del Diagrama del Laboratorio de Salinidad de los EUA (1953) propuesto para determinar la calidad de las aguas para riego, se ha determinado que entre puente Japonés y Carasilla para la gestión 1998-99 (Diciembre), estas aguas pertenecen, a las clases C3-S2 y C4-S3, es decir son aguas de las clases C 3 (salinidad media a elevada) y C 4 (aguas con salinidad elevada) y por lo tanto su uso es sólo recomendado en suelos de permeabilidad moderada a buena, situación que no se presenta normalmente en la mayoría de los suelos de la zona.

Por otro lado, de acuerdo a la evaluación de Ayers & Tanji (1981) en base a los parámetros de SAR o RAS (Relación Sodio adsorbido) y CE (Conductividad Eléctrica), las aguas de riego están catalogadas para el mes de Septiembre como de calidad ligera a moderada debido al papel positivo que cumplen sus concentraciones de electrolitos sobre la estructura y permeabilidad de los suelos. Mientras que según la evaluación de Ayers y Wescott (1985), su alto contenido de cloruros tiene una importante restricción para el riego de las plantas y su contenido de bicarbonatos queda ligero a moderado. Los contenidos de boro en el río Desaguadero en el mes de Octubre (puente Japonés y puente Carasilla) fluctúan entre 1,27 y 1,54 ppm, concentraciones permisibles a buenas según Leeden et. al (1990). Considerando que las aguas del Desaguadero contiene entre 1,2 a 2 gramos de sólidos totales por litro (entre puente Japonés y puente Carasilla) y que cada metro cuadrado de suelo cultivado recibe como promedio durante el año entre 110 a 300 l, esta superficie estaría recibiendo anualmente cerca de 132 a 600 gramos de sólidos, lo que en 20 años de riego significa una adición entre 2,64 a 12 kilogramos de material fino, situación que puede incidir sobre la permeabilidad de los suelos.

Calidad de agua en los canales de riego

La variación de la calidad de las aguas en los canales de riego, es decir desde la toma (canal principal) hasta los canales secundarios es variable, aumentando en algunos casos el contenido de algunos iones y disminuyendo en otros. Las mayores variaciones en la calidad de las aguas se notan en el Choro (Japo) posiblemente debido a la mayor longitud que tienen sus canales de riego y su paso por diferentes tipos de suelo.

Las concentraciones totales de la mayoría de los metales pesados son muy bajas ya que presentan para la mayoría de los casos valores negativos y por consiguiente no existen aportes sustanciales con el riego complementario. Tanto en puente Japonés y puente Carasilla, no existen para la mayoría de los metales cambios importantes de concentraciones. Sólo en el caso del boro, arsénico y hierro se nota en la época húmeda (Diciembre) del año cierta dilución en relación al mes de Octubre, mientras que el Cu aumenta. En el mes de Octubre se nota que sólo los contenidos de As, Fe y P disminuyen a medida que se avanza hacia el Sur, mientras que en el mes de Diciembre sucede lo contrario para el P y Fe. A diferencia de los elementos anteriormente señalados el boro sufre en el mes de octubre una disminución a medida que se avanza hacia El Choro, mientras que en el mes de Diciembre, aumenta.

Tanto en el canal principal como secundario, los contenidos de metales como: Zn, Cd, Pb, Ag, Co, Cr, Ni, Sb, Mn y Hg, se encuentran por debajo de los límites propuestos por la FAO : Concentraciones Máximas Recomendadas en Aguas de Riego (1972) y La Reglamentación de la Ley del Medio Ambiente de Bolivia (anexo A): Estándares de Calidad de Aguas para Cuerpos de Agua Ecológicos (1995). Solo el arsénico se presenta por encima de los límites permisibles de ambas referencias (5 a 6 veces más que el límite propuesto por la FAO) y para todas las clases en el caso de la reglamentación boliviana.

Influencia de la textura y química de los suelos

Los suelos de este sector presentan diferente grado de evolución debido a su textura, desde franco arcillo arenosos, francos, franco arcillo limosos, franco arcillosos y arcillosos. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) en general es moderada y sólo en algunos casos baja, debido al predominio de partículas gruesas , mientras que el total de bases intercambiables (TBI) fluctúa

entre valores moderados a muy altos. El Ca y Mg intercambiable tienen concentraciones desde bajas a altas, el K desde altas a muy altas y el sodio desde bajas a muy altas (especialmente en el subsuelo). La saturación de bases en el sector es alta debido al predominio de los cationes bivalentes y monovalentes en el complejo de cambio.

Los contenidos de materia orgánica en general son desde moderados a altos en la capa superficial y por consiguiente esta situación puede incidir de manera significativa en la fijación de los metales pesados y su baja disponibilidad mientras ésta no se mineralice. El contenido de fósforo fluctúa entre valores bajos a altos.

En base a los resultados obtenidos, y comparando en cada zona en forma particular el testigo con las parcelas bajo riego, podemos decir que para la mayoría de las 8 zonas estudiadas en Santa Ana (Chilahuala) y Japo (El Choro), existe cierta tendencia a la acumulación de sales y de Sodio Intercambiable (PSI) a medida que aumentan los años de riego. Esta situación es más marcada en los suelos más pesados donde el movimiento de aguas es más lento; no ocurre cuando la textura gruesa del suelo permite el lavado de sales. Como estos suelos tienen mayor número de cargas negativas debido al contenido de arcilla hay más posibilidades de que el sodio de las soluciones pase a ser retenido por el complejo de cambio y reemplace al Ca y Mg. Por otro lado, este aumento de las sales y especialmente del PSI está relacionado con el aumento paulatino del pH en las parcelas regadas.

Si bien este aumento de sales o PSI produce impactos sobre las propiedades del suelo, por el momento los niveles de salinización y alcalinización no han alcanzado los niveles críticos de referencia (4 dS m^{-1} y $>15\%$, respectivamente). Sin embargo, tomando en cuenta que estos procesos son acumulativos, y que la mayor parte de los suelos estudiados presentan texturas más pesadas en el subsuelo, la intensificación del riego gracias a las obras de regulación del Plan Director Binacional podría acelerar estos procesos y acelerar la pérdida de la capacidad productiva de las tierras

Metales en el suelo

Cu, Ni, Zn, As, Co, Cr, Pb, Ag, Al, Fe y Sr, se presentan en mayores concentraciones totales en

las parcelas bajo riego en comparación a la parcela testigo, lo que estaría demostrando cierta incidencia del riego a pesar de que los contenidos de los metales en el agua de riego son bajos. Contenidos elevados en arcilla y en materia orgánica por un lado, pH elevados en el caso de carbonatos y sulfatos, contribuyen a inmovilizar los metales en el suelo, evitando así su concentración en las plantas.

Las concentraciones totales de los metales (Ni, Cr, Pb, Ag, y Sr) encontradas en las parcelas de estudio de la zona, en la mayoría de los casos (capa arable y subsuelo) se encuentran dentro de las concentraciones comunes propuestos por Kloque (1980) a excepción del cobre, zinc y cobalto que sobrepasan sus rangos comunes y especialmente en las parcelas con mayor número de años con riego. Sólo en el caso del arsénico sus concentraciones sobrepasan también la máxima tolerable (Kloque, 1982), especialmente en las parcelas con más años de riego, y por lo tanto se constituye en el único elemento contaminante de riesgo.

Como la mayor parte de los resultados presentados por varios autores: Dinchev (1972), Yagodin (1982) Yurinek , Bawer y Elgalabi (1980), FAO (1989), Bohn *et al.* (1993) , Aguilar *et al.* (1993) Camilion (1999), Sposito *et al.* (1999) coinciden en afirmar que la mayor parte de estos metales no son fácilmente disponibles para las plantas en suelos neutros a básicos, de textura fina y contenidos elevados de arcilla y materia orgánica y presencia de carbonatos o sulfatos, todo parece indicar que en los suelos de las zonas estudiadas, por presentar las condiciones arriba indicadas, no se esté presentando por el momento una alta disponibilidad de estos elementos y por consiguiente su acumulación en el chiji y alfalfa es baja a pesar de existir sectores que se están regando por varias décadas.

Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que a futuro existe un peligro latente, si continúa el mencionado aporte de metales, de que se sobrepasen los límites de fijación por el suelo y sean liberados en una forma disponible para las plantas. Por otro lado, cada especie vegetal tiene un comportamiento diferente y por consiguiente mayor o menor capacidad para extraer metales del suelo.

Metales en la vegetación

En general podemos indicar que las concentraciones de: Pb, Cr, Cd, Ag, Cu, Ni, Zn, Co, Mo, Sn,

As y Hg en la vegetación estudiada (Chiji y Alfalfa) tanto en Santa Ana como en Japo, se presentan bajo diferentes años de riego o a secano en cantidades muy variadas que difieren de un lugar otro, y no permiten diferenciar las situaciones bajo riego y a secano. Estas variaciones pueden deberse en primer lugar a la incidencia marcada que tiene el medio donde se desarrollan estas especies y en especial del suelo: como su textura (contenido de arcilla), pH, contenidos de materia orgánica y carbonatos, factores que inciden sobre la fijación de los metales en el suelo y por consiguiente sobre una mayor o menor disponibilidad para las plantas.

El Cu, Zn, , Mo y As se encuentran tanto en el chiji como alfalfa dentro de las concentraciones normales propuestas por Chapman y Prat (1973), los mismos que se encuentran muy por debajo de su límite superior. Sólo el cobalto se encuentra muy cerca o igual a su límite superior, y en algunos casos, por encima de su límite.

La proporción variada de metales en alfalfa y Chiji está demostrando por un lado que los suelos de la zona contienen en forma natural metales y de esta manera el riego no es la única fuente de estos elementos. Por otro lado, en las zonas de riego debido a la escasa profundidad de enraizamiento del Chiji en relación a la alfalfa, parece existir un mayor aprovechamiento de los metales aportados con el riego.

El boro, otro de los elementos importantes analizados, se encuentra en mayores concentraciones en la alfalfa de todas las zonas estudiadas (Santa Ana y Japo) en relación al Chiji. Probablemente esto se deba a que este elemento no sólo es aportado actualmente por el agua de riego, sino también que los sedimentos fluvio-lacustres de la llanura contienen este elemento en cantidades importantes y por otro lado la alfalfa se caracteriza por su tolerancia a altos contenidos de este anión y a su raíces profundas que le permiten extraer.

5.4.2.3. Influencia del riego en los procesos de salinización y sodificación en suelos de la provincia Gualberto Villaroel (R. Ledezma)

Introducción

El río Desaguadero, única fuente superficial permanente de agua en la provincia G. Villarroel, ha tenido un limitado aprovechamiento de sus aguas para el riego, tomando en cuenta su contenido

en sales. En la provincia Villarroel el riego se inició en 1963, y hasta la fecha muchos han sido los comentarios de profesionales e instituciones sobre la irracionalidad de esta actividad. Pese a estos comentarios, la necesidad de abastecimiento de agua para riego ha obligado a los comunarios a construir sistemas de riego comunales para regar forraje, cebada, y haba que no se podían cultivar hasta ese entonces.

La experiencia desarrollada por los agricultores permitió identificar algunos efectos del riego sobre los suelos : “parece que algunos suelos se mejoran” y “parece que algunos suelos se arruinan y se vuelven salitrosos”. Esta situación ha originado que se evalúen por una parte los métodos de riego para determinar las láminas de riego aplicadas, las frecuencias entre riegos y la eficiencia de aplicación del riego, y por otra parte las características del suelo como sus propiedades texturales, densidad aparente, las características del perfil y su drenaje. Se toma en cuenta finalmente la profundidad del agua subterránea y la calidad de esta agua que inciden en el riego y drenaje.

Los usuarios de riego tienen de 1 a 3 hectáreas bajo riego, el método de riego aplicado es por gravedad, los caudales manejados varían entre 5 y 15 l/s, las láminas de riego aplicadas son altas (entre 8 y 20 cm), con lo cual se alcanzan fracciones de lixiviación superiores a 0.5. El riego se realiza con una frecuencia de entre 2 a 4 veces por año, de agosto a noviembre, antes de la época de lluvias, y cada riego tiene una duración de entre 8 a 12 horas.

El agua tiene una calidad C3S2, es decir con alto riesgo por sales y riesgo medio por exceso de sodio (Allison, 1974). Se tiene restricciones de medias a severas de acuerdo a Ayers Wescot (1987) para su uso en riego intensivo. En el área del estudio, el riego es de tipo suplementario, y se aplica solamente antes de la época de lluvias, para la instalación de los cultivos de alfalfa, cebada y haba principalmente, los cuales presentan tolerancias moderadas a la salinidad.

Efecto del riego sobre la salinización y sodificación de los suelos

De acuerdo a las características del riego descritas anteriormente, se han evaluado parcelas regadas durante 5, 6, 12, 15 y 20 años, mayormente cultivadas en alfalfa. Se resume los resultados en tres tipos de suelo : (1) quinua después de 5 años consecutivos de riego, en un suelo

altamente salino sódico con drenaje relativamente adecuado, (2) alfalfa, en una parcela regada durante 6 años, en un suelo altamente salino sódico con mal drenaje, (3) alfalfa, en una parcela regada durante quince años, sin problema de sales ni acumulación de sodio. Como testigo sin riego, se han tomado muestras, a una distancia no mayor a 200 metros, en terrenos adyacentes donde no se han realizado labores agrícolas.

1- Suelo altamente salino sódico con drenaje relativamente adecuado

Los suelos altamente salino sódicos se presentan en forma de manchones conjuntamente con suelos altamente salinos, ocupando miles de hectáreas, dentro del área de estudio. Estos suelos en general no se utilizan para la agricultura. El testigo, no cultivado, presenta una textura arcillosa con estructura en bloques angulares medianos, con un grado de estructuración débil a moderado, con una densidad aparente de 1.41 gr.cc^{-1} y con infiltración superficial. El horizonte superficial presenta una concentración de sales muy alta (54 mS.cm^{-1}), la cual va decreciendo hacia los horizontes inferiores. Este contenido de sales impide el desarrollo de todos los cultivos de la zona, inclusive de las plantas tolerantes, las cuales presentan una vegetación muerta. El PSI, a lo largo del perfil analizado, es mayor a 15 %, presentando limitaciones para los cultivos sensibles y algunos semitolerantes; la alfalfa y la cebada son tolerantes a estos niveles.

De este análisis se puede concluir que estos suelos en estado natural no son aptos para la producción principalmente por su alto grado de salinidad.

La parcela con riego presenta una textura superficial arcillosa, con una estructura en bloques angulares medianos en proceso de compactación, productos de la de floculación del suelo. Sin embargo, el efecto del laboreo influye en la tasa de infiltración, incrementándose la infiltración acumulada en 4 horas de 16 cm en el terreno testigo a 26.5 cm en la parcela con riego, permitiendo de esta forma una mejor infiltración del agua de lluvia, facilitando el desplazamiento de las sales. En referencia a la salinidad, los valores de CEe disminuyen a lo largo del perfil presentando una brusca disminución de la CEe del suelo, hasta niveles bajos. Las tasas de disminución presentadas son de -9.26 , -4.27 y -5.14 $\text{mS. cm}^{-1}/\text{año}$ en el primer, segundo y tercer horizontes respectivamente. En el horizonte superficial el suelo pasa de ser clasificado como altamente salino en el terreno testigo, a salino en la parcela con riego (de 50.54 mS.cm^{-1} a 4.25 mS.cm^{-1}), en los horizontes inferiores

también se presenta disminución pasando de ser suelos altamente salinos a no salinos, a nivel de iones solubles se presentan disminuciones fuertes.

Esta situación es atribuible a un efecto de lavado de sales ocasionado por el riego, debido a las características físico-químicas del agua, su forma de manejo y las características propias del terreno, que posee un drenaje relativamente adecuado, con una napa freática profunda (más de 4 m de profundidad).

Estudios realizados por Rhoades et al. (FAO, 1993), plantean una relación de equilibrio entre la salinidad del agua de riego y la del extracto de saturación, en función de las fracciones de lixiviación de riego aplicadas en riego tradicional y en riego intensivo. En estos se pueden observar que para un agua con una CEE de $2 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ y para una fracción de lixiviación de 0.5 bajo el sistema de manejo tradicional, la concentración en el extracto de saturación de la zona radicular promedio que se tendría es de aproximadamente $1.45 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, lo cual nos indica que los niveles de salinidad observados en los resultados son posibles y el suelo se encuentra aun en proceso de lavado. El PSI disminuye a lo largo del perfil, presentando valores menores a los grados de alcalinidad (<15%), con tasas de -1.83, -1.14 y -1.24 % PSI, en el primer, segundo y tercer horizontes. Estos suelos pasan de ser sódicos a no sódicos.

En este caso, el calcio se presenta en menor concentración que el sodio, disminuyendo su concentración a niveles bajos, lo cual incrementa su actividad, según la ley de Gapon a menor concentración o mayor dilución de iones, mayor actividad iónica y por lo tanto mayor adsorción en el complejo de cambio. El calcio intercambiable varía en su concentración en el complejo de cambio ligeramente, razón por la que la disminución del sodio intercambiable, proporcionalmente se refleja en una disminución del PSI. El magnesio y potasio varían en su concentración muy ligeramente por sus características propias de menor actividad. Se observa una disminución de la suma de bases intercambiables en el primer horizonte, un incremento en el segundo y otra vez una disminución en el tercero, por la dinámica del agua mencionada anteriormente.

El pH en KCl, presenta un incremento a lo largo del perfil, manteniéndose en todos los casos por debajo del pH indicador de alcalinidad (pH 8.5). Sin embargo, el suelo sódico sin riego (testigo)

presenta también valores menores, lo cual podría deberse a la presencia de sales como el sulfato de calcio SO_4Ca en el extracto de solución del suelo. Una situación similar se presenta con el pH medido en el extracto de saturación de los suelos, donde el incremento también es a nivel general, pero sin sobrepasar el pH indicador (8.5). De esto se puede concluir que el pH no indica un estado de alcalinidad.

Respecto a la toxicidad específica del cloruro y del boro, verificaremos los niveles alcanzados:

- Los niveles de cloruros disminuyen bruscamente hasta niveles tolerantes de 308.2 a 14 meq.l^{-1} en el horizonte superficial, en este caso no se presentan limitaciones para el cultivo de la alfalfa y la cebada, por que su grado de tolerancia es mayor a 20 meq.l^{-1} . De esta forma se tiene que la solución del extracto del suelo no presenta limitaciones para el desarrollo de los cultivos.
- En el caso del Boro, se presenta un ligero incremento en el horizonte superficial de 2.43 a 3.76 mg/l y una disminución en el segundo y el tercer horizontes (de 12.09 a 3.67 en el 2do. y de 9.26 a 3.08 en el 3ro.). Su concentración en la solución del extracto del suelo, no es limitante para el cultivo de la Alfalfa, y es ligeramente limitante para el cultivo de la cebada, en el caso de la quinua no se tienen referencias.

En conclusión, este tipo de suelo altamente salino sódico pasa a ser salino y no sódico. El efecto de la labranza es esencial para el mejor aprovechamiento del agua de lluvia y el efecto mulching sobre la dinámica del agua. Se presenta una alta disminución de los niveles de cloruros, hasta alcanzar valores que no son limitantes para los cultivos de la zona. Es entonces limitante solamente para cultivos sensibles; la alfalfa presenta limitaciones parciales; los cultivos de la zona cebada, quinua, cañihua y haba no presentan limitaciones, salvo la cebada por el contenido en boro.

2- Suelo salino con horizontes inferiores salino sódicos y con mal drenaje

Estos suelos también ocupan miles de hectáreas en el área de estudio, normalmente éstos se encuentran ubicados en zonas de transición entre suelos normales, salinos y/o sódicos caracterizándose en este caso como suelo salino en la superficie y salino alcalino en los horizontes inferiores. Se utilizan para el cultivo de alfalfa, cebada y haba.

Las parcelas con riego presentan algunos signos de erosión hídrica laminar ligera y los suelos son muy heterogéneos. El terreno testigo presenta un horizonte superficial de textura franco arcillosa, compacto. Presenta una acumulación de sales en el segundo horizonte caracterizado como un horizonte B, por su mayor contenido de arcilla. Sus niveles son salinos en el primer y tercer horizontes y altamente salino en el segundo horizonte, en este caso se presentan limitaciones para cultivos sensibles y moderadamente sensibles como la alfalfa y la cebada. En relación al PSI, se presenta también una acumulación en el segundo horizonte, el nivel de PSI en el primer horizonte es menor al 15 % , considerándose al suelo como normal; en cambio, en el segundo horizonte es altamente alcalino, el tercero es alcalino. En este caso el primer horizonte presenta limitaciones sólo para cultivos sensibles, en cambio en el segundo horizonte presenta limitaciones hasta para cultivos semitolerantes, la alfalfa y la cebada son tolerantes a estos niveles.

En este caso, el terreno circundante presenta limitaciones para la producción de alfalfa en condiciones óptimas de rendimiento, la cebada no presenta limitaciones, empíricamente la quinua y la cañihua tampoco.

La parcela con riego presenta las siguientes características de salinidad. La CEE disminuye en los dos primeros horizontes con tasas de -0.9 y -1.88 mS.cm^{-1} /año respectivamente, de 6.81 a 1.41 mS.cm^{-1} en el 1ro y de 15.07 a 3.79 en el 2do. pasando de ser salinos a no salinos, en el tercer horizonte la CEE se mantiene prácticamente constante, manteniéndose como suelo salino (cuadro E5a). Los aniones y cationes solubles disminuyen también en los dos primeros horizontes (cuadro E5b). Dos factores facilitan este lavado: la textura superficial de la parcela, más arenosa y el laboreo del suelo, en el primer horizonte. El segundo horizonte, más arcilloso, tiene una infiltración más lenta, una mejor dilución de las sales y un mayor intercambio catiónico. Los niveles de sales en la parcela con riego solamente son limitantes para cultivos sensibles. La alfalfa es limitada en su rendimiento en un 100%, la cebada y otros cultivos de la zona no se limitan por esta tasa de salinidad.

En relación al PSI, su concentración se presenta en forma decreciente, de arriba hacia abajo, se observa un incremento en el primer horizonte con una tasa de 2.8 PSI/año , presentando un proceso de sodificación de 10.99 a 27.76 , una disminución en el segundo y tercer horizontes, con

tasas de -4.12 y -1.87 % PSI/año, hasta niveles más bajos, con reducciones de 39.91 a 15.16 y de 17.72 a 6.51 % PSI. En este caso, el incremento del PSI en el primer horizonte puede deberse a un efecto de dilución del Na soluble del primero y segundo horizontes, lo cual llevaría a equilibrar su contenido en ambos horizontes, por el mayor tiempo de saturación con el agua de riego que se presenta en el horizonte B arcilloso. En este caso no se presentan limitaciones para los cultivos de alfalfa, cebada, quinua y cañihua, aunque si se presentan limitaciones para cultivos moderadamente tolerantes.

A partir de esta información se puede decir que la parcela con riego no presenta limitaciones para los cultivos de la zona, con respecto a la salinidad y sodicidad del suelo. La suma de bases intercambiables presenta un incremento a lo largo del perfil y principalmente en el horizonte superficial, posiblemente por el aporte de materia orgánica y su contenido en arcilla.

El pH en KCl se incrementa en el primer horizonte hasta niveles cercanos a la neutralidad, en el segundo y tercer horizontes disminuye hasta niveles más bajos, incluso ligeramente ácidos, esta situación se relaciona con el incremento de Ca en el primer horizonte y la presencia predominante de sulfatos de Ca y Mg en los horizontes inferiores.

Respecto a la toxicidad específica en cloro y en boro:

- En el caso del cloro, se presenta una disminución de cloruros en el primer y segundo horizontes, de 19.86 a 4.40 meq/l y de 34.55 a 12.38 meq/l respectivamente, en el tercero se presenta un muy ligero incremento de 13.6 a 13.85. Estos niveles de cloruro no son limitantes para los cultivos de la zona, la quinua y la cañihua no presentan síntomas de toxicidad por este elemento, por lo cual no se limitan.
- En el caso del boro se presenta una disminución en su contenido a lo largo del perfil, de 7.07 a 2.93 mg/l en el primero, de 19.31 a 2.44 en el segundo y de 7.34 a 4.06 en el tercero, presentando ahora niveles limitantes solamente para cultivos moderadamente sensibles y sensibles. La cebada se limita en este caso solamente en el tercer horizonte, en cambio la alfalfa es tolerante y no presenta limitaciones.

En conclusión, el suelo salino con horizontes inferiores altamente salino alcalinos, utilizado para riego, disminuyó su contenido salino, sufriendo un proceso de sodificación en el primer horizonte. De esta manera, los terrenos se habilitan para el establecimiento de la alfalfa y la cebada, con

limitaciones de rendimiento. El riego suplementario bajo el sistema de manejo actual no presenta riesgos de degradación por salinización, aunque se tiene un riesgo de sodificación superficial producto de la presencia de un horizonte B arcilloso. Los niveles de cloruro no afectan a los cultivos de la zona. El contenido de Boro es limitante para la cebada solamente en el tercer horizonte, no así para la alfalfa, quinua y cañihua, que pueden desarrollarse sin limitaciones.

3- Suelo normal

Los suelos de este tipo también sobrepasan los miles de hectáreas dentro el área de estudio, ocupando menor proporción del área de estudio que los suelos afectados por la salinidad y/o sodicidad. Estos suelos se ubican en una unidad de suelos clasificada como normal, y se utilizan normalmente para los cultivos de alfalfa, haba, cebada, quinua y cañihua. El agua utilizada para riego al igual que en el anterior caso, proviene del Río Desaguadero a través de los canales.

El terreno testigo presenta una textura superficial arcillosa, con estructura en bloques angulares gruesos con grado de estructuración débil, con una densidad aparente de 1.48 gr.cc^{-1} . Estas características de suelo pesado repercuten en una baja tasa de infiltración caracterizándose como una zona con drenaje superficial lento. La salinidad crece con la profundidad. En relación al PSI presenta también una distribución en forma creciente de arriba hacia abajo, sus valores se encuentran por debajo de los límites para considerarlos alcalinos ($< 15 \%$ PSI), presenta limitación para cultivos sensibles, no así para los cultivos de la zona por su mayor grado de tolerancia. De esta manera, se puede decir que estos suelos son aptos para los cultivos de alfalfa, cebada, haba, quinua y cañihua.

La parcela con riego presenta una estructura en bloque angular grueso con grado de estructuración débil, con una densidad aparente de 1.52 gr.cc^{-1} . La prueba de infiltración superficial realizada en la parcela con riego presenta una infiltración acumulada de 8.4 cm en 5 horas de contacto, en cambio en la parcela sin riego se tiene una infiltración acumulada de 9 cm. Esta situación particular se debe a que el terreno donde se encuentra el alfar, no fue bien preparado, ocasionando que dentro de la parcela se presente una menor infiltración superficial, es decir que en este caso la prueba en la parcela con riego no es representativa. En este caso las propiedades físicas no constituyen un buen indicador de los efectos del riego, principalmente porque existen diferencias texturales entre los horizontes con riego y sin riego, debido a variaciones naturales de formación, aunque los terrenos

presentan una misma clase textural, en realidad sus contenidos de arcilla varían entre 2 y 7 %. Esta situación es una limitante para la realización de las comparaciones, principalmente por que se alteran los resultados, lo que no permite una buena estimación de los efectos del riego.

La salinidad del suelo representada por su CEE se incrementa en orden creciente de arriba hacia abajo, con tasa de 0.02 , 0.04 y 0.24 mS.cm⁻¹/año, en el primer segundo y tercer horizontes. En este caso se presenta un incremento de aniones y cationes solubles, en todos los horizontes y en todos los casos, excepto el caso del sodio soluble en el tercer horizonte. Esta disminución puede darse por efecto del riego : el agua de riego tiene contenidos variables de Ca, Na , Cl y SO₄, los cuales se acumulan en este caso, aumentando la concentración de los iones en el extracto de saturación de suelos. Este fenómeno de acumulación se presenta por el bajo contenido de sales que presenta naturalmente este suelo y por la lenta infiltración del agua de riego. El primer y segundo horizontes no presentan concentraciones superiores al nivel de salinidad 4 mS.cm⁻¹, sin embargo el tercer horizonte pasa a ser salino con una CEE de 5,76 mS.cm⁻¹. En este caso la alfalfa es limitada en su rendimiento de 100%, la cebada y los otros cultivos no se limitan por estos niveles de salinidad.

En relación a la sodicidad, existe un incremento del PSI con tasas de 0.31 a 0.21 PSI/año, en el 1er y 2do horizontes, y ninguna variación significativa en el tercer horizonte (tasa de -0.01 PSI/año). Esta situación es atribuible en parte a diferencias texturales , la cual refleja un mayor porcentaje de PSI en relación al CIC. Por otro lado, el agua de riego presenta contenidos de Na intercambiable que tiende a acumularse en el suelo aumentando su RAS, especialmente en el 1er y 2do horizontes, el cual repercute en un incremento del PSI. De esta manera el PSI del suelo es limitante sólo para cultivos sensibles, los cultivos de la zona no presentan limitaciones a estas concentraciones.

El Mg y el K cambian muy ligeramente en su concentración, sus valores se mantienen prácticamente constantes. La suma de bases intercambiables presenta diferencias, que son más atribuibles a variaciones texturales. En referencia al pH en KCl se incrementa a lo largo del perfil con valores alrededor de la neutralidad sin sobrepasar el pH 8.5 en el caso del pH en extracto de saturación. Se incrementa en el primer y segundo horizontes, presentándose en el tercer caso una situación especial, con un pH menor a 7, que se refleja a través de un incremento de la concentración de sulfatos

solubles muy alto en este horizonte. En este caso tampoco influye la disponibilidad de elementos en el suelo.

En el caso del cloro, su concentración se incrementa a lo largo del perfil, en orden creciente de arriba hacia abajo, sus valores son bajos entre 0.9 y 7.17 meq.l⁻¹, sin sobrepasar los límites de tolerancia para los cultivos de la zona, en el caso de la quinua y cañihua no se observan síntomas de toxicidad. Los valores del boro se incrementan en orden creciente de arriba hacia abajo, con valores entre 0.7 a 6.48 mg.l⁻¹; estos suelos en el caso del 1er y 2do horizontes, son limitantes para cultivos sensibles y para los moderadamente tolerantes, en el caso del 3er horizonte es limitante también para cultivos tolerantes. En este caso la alfalfa y la cebada no se limitan en el primer horizonte, sin embargo en el tercero su sistema radicular será limitado por la concentración de boro.

En conclusión, el suelo clasificado como normal, luego de 15 años de riego, se mantiene normal superficialmente, pero se saliniza en los horizontes inferiores; presenta limitaciones para la producción de alfalfa en un 100%; la cebada y los otros cultivos de la zona no se limitan por su contenido de sales. El riego suplementario bajo el sistema actual de manejo presenta riesgos de salinización bajos para los horizontes superficiales. Los niveles de cloro no limitan la producción de los cultivos de la zona. El nivel de boro puede limitar los rendimientos.

6. QUINCE AÑOS DE RELACIONES EXITOSAS ENTRE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN EN LA PROVINCIA G. VILLARROEL (R. Ledezma, D. Hervé)

6.1. Introducción

Dentro de las numerosas iniciativas no gubernamentales en el altiplano boliviano, se destaca el trabajo de 15 años de una ONG boliviana, Yunta, en una de las zonas más pobres y desatendidas del país, la provincia Gualberto Villarroel. El objetivo de esta reflexión sobre las relaciones exitosas entre desarrollo e investigación es no solamente identificar las estrategias de desarrollo, sino estudiar cómo han sido implementadas, a partir de un caso bien documentado.

Yunta tiene su origen en otra ONG, con experiencia en embalses y captaciones de agua potable, en la provincia Camacho del departamento de La Paz, cerca de los valles de Sorata. Inició sus actividades en la provincia Gualberto Villarroel en 1983, con un plan de emergencia contra la sequía, a raíz del Niño, y con un primer microriego para alfalfa en 1985. Las ONG estaban muy alejadas de las políticas gubernamentales en esa época. Yunta, con el apoyo de la Cotesu (Cooperación Técnica Suiza), empezó con la distribución de semillas forrajeras (cebada y alfalfa) y la perforación de pozos. Estas dos prioridades de apoyo, agua y forrajes, marcaron los 15 años de desarrollo que queremos relatar aquí.

Una originalidad de esta experiencia es que los agentes de desarrollo supieron promover trabajos de investigación y aprovecharlos. Analizamos entonces las crónicas juxtapuestas de los proyectos de desarrollo (cuadro 6.1) y de las operaciones de investigación (cuadro 6.2), implementados en la provincia, para explicar cómo se encadenaron las diferentes etapas. Extraemos finalmente las enseñanzas de esta fecundación recíproca, a manera de propuestas.

6.2. Asistencialismo y primeros estudios (1983-1990)

Al iniciar su labor en la provincia Villaroel, YUNTA se ha definido como objetivo principal el desarrollo local autogestionario y ha buscado establecer bases productivas con agua y forraje. Se planteó entonces evaluar el aprovechamiento de recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos:

- analizar la potencialidad del recurso agua subterránea mediante una prospección de sondeos eléctricos,
- evaluar la posibilidad de riego a partir del acuífero,
- estudiar los limitantes de los suelos salinos de la zona baja y los riesgos de salinización ligados a las prácticas tradicionales del riego.

Desde el año 1983 con COTESU y en 1987-1988 con el Fondo Social de Emergencia (FSE), Yunta ha ido desarrollando trabajos para el aprovechamiento de los recursos hídricos especialmente subterráneos para el consumo familiar y luego para el riego. El riego se ha diseñado para superficies de hasta 10 has de cultivos forrajeros y hasta 1 ha de cultivo de hortalizas a campo abierto. El aprovechamiento de recursos hídricos mediante pozos perforados se inició con equipos de perforación manual, luego pequeñas perforadoras de tipo Hidra Drill, hasta llegar a contar en la actualidad con equipos de perforación a rotación de Lodos.

En 1988 – 1989, se reportan los primeros contactos entre Yunta y Sophie Moreau para trabajos contractuales de teledetección. Con el FSE, se desarrollaron sistemas de riego a pequeña escala para la producción de hortalizas en carpas solares comunales. Estos proyectos se prolongaron hasta 1990, con fondos rotatorios financiados por el Catholic Relief Service (CRS).

Cuadro 6.1. Cronología de los proyectos ejecutados por Yunta (R. Ledezma & D. Hervé)

PERIODO	PROYECTO	FINANCIAMIENTO
1983 - 1984	Plan sequía	Cotesu - Suiza
1985 - 1987	Pozos, alfalfa. Desarrollo autogestionario basado en organizaciones productivas.	Cotesu - Suiza
1988 - 1989	Microproyectos familiares, Salud comunitaria. Desarrollo Integral.	FSE - Fondo Social de Emergencia CRS - Catholic Relief Service, Bolivia.
1990	Construcción de sistemas de riego. Construcción de sistemas de agua potable (Caranavi).	FADES - Bolivia CRS - CARITAS, Bolivia
1991	Fortalecimiento productivo	OXFAM - Canada
1990 - 1991	Organización y producción comunal para el autodesarrollo	AOS - Suiza
1992	Autodiagnóstico de la provincia G. Villaroel (Zona baja) Plan estratégico institucional 92/94	PROCADE - Bolivia AOS - Suiza
1992 - 1993	Sistema de agua potable, Provincia Enrique Baldiviezo, Potosi	
1993 - 1994	Sistema de agua potable, Caranavi. Elaboración Plan de Desarrollo Microregional en la provincia Gualberto Villaroel.	PROCADE - Bolivia
1994	Micro Proyectos de salud y nutrición comunitaria	SOH - Holanda
1994 - 1995	Elaboración Diagnóstico socio-económico de la provincia Gualberto Villaroel.	PROCADE - Bolivia
1996	Elaboración Plan de desarrollo municipal de la Primera Sección: San Pedro de Curahuara, Prov. Villaroel	H.A.M. - Alcaldía Municipal de San Pedro de Curahuara
	Elaboración Plan de desarrollo municipal de la Segunda Sección: Papel Pampa, Prov. Villaroel	H.A.M. - Alcaldía Municipal de Papel Pampa
1996 - 1997	Proyecto de mejoramiento ganadería vacuna lechera	PROCADE - Bolivia
1996 - 1998	Proyecto Desarrollo integral de la producción ganadera	SOLIDARIDAD INTERNACIONAL - ACSUR - España
1998 - 2001	Seguridad alimentaria en las comunidades campesinas de la provincia G. Villaroel	Unión Europea
1999 - 2002	Producción familiar y salud comunitaria orientada al mejoramiento del estado nutricional	SOH - Holanda

Cuadro 6.2. Interacción entre desarrollo e investigación (R. Ledezma & D. Hervé, 2001)

DESARROLLO	AÑOS	INVESTIGACION
1- Asistencia en agua y forraje	1983-1990	
Plan emergencia contra sequía.	1983-84	
Distribución semillas forrajeras, <i>pozos</i> (COTESU, YUNTA)		
Fondos rotativos de <i>semilla</i> de alfalfa y cebada (ONG suiza)	1985-87	
Pozos y carpas solares comunales (FSE)	1987-88	
<i>Microriego</i> y fondos rotatorios (CRS)	1988-90	
Instalación de pastos y forrajes (alafalfa, gramíneas)		
2- Planes de desarrollo	1990-1995	
Sistema de Abastecimiento de Semilla, Microriego, Pozos familiares, Salud primaria y nutrición (AOS, SOH, MU)		
	1989-91	Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas (S. Moreau)
	1992-93	Modelización del acuífero (P. Younger), primeros intentos de difusión de Atriplex y Kauchi
<i>Diagnóstico</i> socio-económico de la zona baja de la provincia G. Villaroel (Ledezma)	1993-95	Dinámica de los acuíferos (Coudrain, Jimenez, Pratz)
	1991-95	Suelos salinos y/o sódicos (S. Moreau, R. Ledezma)
<i>Plan de desarrollo</i> municipal 1ra y Segunda secciones de la provincia G. Villaroel	1992-95	Influencia del riego en los procesos de salinización y sodificación de los suelos (Tesis de R. Ledezma)
3- Fomento ganadero y municipios	1996-2000	
Fomento ganadería bovina lechera (PROCADE-SOLIDARIDAD INTERNACIONAL-ACSUR)		
Producción familiar y salud comunitaria (SOH, MU)	1996-98	Siembra de Kauchi en suelos salinos y/o sódicos (R. Ledezma)
	1997-99	Evaluación de las praderas nativas, 2da Sección (F. Loza, A.C. Imoff) y Prospección hidrológica superficial 1ra sección (de Alonso)
Infraestructura productiva (microriego, plantas queseras)		
Producción de hortalizas (carpas y campo abierto), Mejoramiento nutricional (quinua, cañahua, papa)	1996-99	Caracterización de los sistemas de producción (C. Guzman, L. Vargas, M. Camacho)
	1998-00	Efecto del riego en la contaminación de suelos. (M. Rocabado, V. Orsag, R. Ledezma)

6.3. De proyectos puntuales hacia un plan de desarrollo basado en investigaciones científicas (1991-1995)

Yunta prosiguió en los años 1990-1995 las propuestas concretas iniciadas anteriormente, que respondían a necesidades reales de la población: fondos rotatorios de semilla de alfalfa y cebada, microriego, pozos y carpas solares familiares en vez de comunales, proyectos de mejoramiento nutricional y salud. Durante el período 1990-95, el SAS o Sistema de Abastecimiento de Semilla, logra su propósito con el establecimiento de más de 5000 ha de alfalfa, o sea un promedio mayor a 2 ha por familia. Pero, en este tiempo, la multiplicación de las acciones emprendidas había conducido a la necesidad de evaluar los recursos hídricos presentes y potenciales. Se entró entonces en una etapa de inventariación de los recursos hídricos.

Esta etapa la inició Sophie Moreau, especialista canadiense en teledetección y salinidad y fundadora de la Asociación Boliviana de Teledetección para el Medio Ambiente (Moreau, 1991). Con un inventario de pozos de agua subterránea en la provincia Gualberto Villarroel, para evaluar la calidad del agua, Paul Younger, un hidrogeólogo, hizo el primer intento de modelizar el acuífero de la provincia Villarroel (1992-1993). Anne Coudrain-Ribstein, hidroquímica del CNRS, acogida en el IRD, profundizó la comprensión de la hidrología de las aguas subterráneas y del origen de la salinidad en la llanura central (1993-1995). Con un cooperante español, Alberto Jimenez, se realizó una prospección geoelectrica. Posteriormente, con un cooperante francés, Bruno Pratz, se persiguió el trabajo de modelización. Es cuando empezó la colaboración entre el Instituto de Hidrología (IHH de la UMSA) y Yunta. La explotación del recurso hídrico subterráneo por un número creciente de familias planteó a Yunta la siguiente pregunta: ¿Cual es la capacidad de aprovechamiento del acuífero de Villarroel? y lo llevó a diseñar una evaluación del recurso hídrico subterráneo. En esta misma época (1992-1995), un técnico de YUNTA, Ruben Ledezma, redactó su tesis de grado de ingeniero agrónomo sobre el manejo de riego en suelos salinos, con el asesoramiento de Vladimir Orsag y Sophie Moreau.

Los años 1992-1994 han sido una suerte de visagra, para que la institución pase de una lógica de proyectos de asistencialismo a una etapa de diagnóstico y planificación del desarrollo de la provincia. Con el cambio del director de la institución, se entró en un plan estratégico institucional de duración trienal (1992-1994). Con el asesoramiento del Procade, se logró en estos

años elaborar un diagnóstico socioeconómico de la zona baja de la provincia, que englobaba la situación geográfica, económica, social, productiva y cultural. Como uno de los problemas principales, se destaca la escasez y bajo nivel de mejoramiento de pastos y forrajes, debido a que las condiciones medioambientales (heladas, precipitación menor a la evapotranspiración, vientos, sequía, etc.) y los limitantes de suelos salinos y/o sódicos, reducen drásticamente la producción. A esta escasez de forraje está ligada una baja producción agrícola (de supervivencia en la zona), en terrenos pequeños y con problemas de organización e infraestructura (escasez de agua potable, malos caminos, carencia de electrificación, etc.), determinando bajos ingresos económicos para el campesino.

Como resultado de este diagnóstico, se obtiene un Plan de Desarrollo Microregional para la zona baja, que posteriormente, con la ley de Participación Popular, se convirtió en Plan de Desarrollo Municipal (PDM) de la primera y segunda secciones de la provincia de Villaroel. Dentro de este plan de desarrollo, el Programa de Medio Ambiente propone habilitar y recuperar las áreas consideradas marginales para la agricultura por problemas de salinidad o sodicidad de suelos, a través del establecimiento de especies halófitas como el kauchi y el atriplex como una de las líneas de acción más importantes para esta zona de la provincia (Yunta-Procade, 1994).

Toda esta etapa, iniciada con el objetivo de contrarrestar la sequía, ha sido orientada por el manejo de los recursos hídricos para incrementar los recursos forrajeros.

6.4. Desarrollo municipal y producción ganadera (1996-1999)

A partir de 1995-1996, la prioridad institucional ha sido definir una propuesta de desarrollo para la provincia Gualberto Villaroel. Esta prioridad orientó la articulación de estudios y diagnósticos con la implementación de los proyectos. También, el fomento de la producción agropecuaria seguía lógicamente la construcción de infraestructuras de riego por gravedad o por bombeo. Aparecen o re-aparecen como prioridades la siembra de forrajeras halófitas o tolerantes a la salinidad y la evaluación de praderas nativas, pero finalizadas en proyectos de fomento ganadero. Luego de dotar de agua a un buen número de familias campesinas y establecer cultivos forrajeros, se intensificó la ejecución de proyectos ligados directamente a la producción ganadera y la

comercialización de los productos pecuarios, en particular leche, queso y animales en pie, vendidos en las ferias.

Los proyectos ganaderos presentados a varias instituciones, contemplan no solamente el incremento de la producción forrajera y la perforación de pozos, sino también el mejoramiento ganadero, infraestructura productiva y la transformación de los productos lácteos con plantas lecheras. La producción de alfalfa ha resultado bastante exitosa, con riego y en lugares donde la napa freática no es demasiado profunda, permitiendo un desarrollo significativo de la ganadería bovina lechera. Pero las extensiones de tierra regadas, aún con todos los esfuerzos institucionales, siempre quedan muy reducidas en comparación con las extensiones de suelos salinos que se podría habilitar sólo con las precipitaciones pluviales. Se pensó también a otros recursos forrajeros para mejorar la producción ovina. Se inició con la colecta de semilla de kauchi, una halófito que coloniza suelos salinos a salino-sódicos. Se adaptó también el sistema de siembra mecanizada mediante zanjas creadas por arados de discos.

La implementación del proyecto kauchi descansa en una organización sólida para la recolección de semillas y un proceso de participación activa de los campesinos en la evaluación y elaboración de perfiles productivos. Así, en los dos años del proyecto, se llevó a cabo un taller de análisis y evaluación de resultados del manejo de praderas y forraje y un taller de difusión y validación de los resultados de la evaluación de manejo de ganado, logrando la participación de 251 familias el primer año y 126 familias el segundo año, en las 19 comunidades que participaron en el proyecto. La siembra de praderas de kauchi es ahora una propuesta técnicamente y económicamente viable (Ledezma, 2001). La evaluación de las praderas nativas de la segunda sección de la provincia Villaroel (1997-1999) contribuyó a medir el impacto de este proyecto kauchi.

La producción forrajera puede integrar también cereales, como la cebada y el triticale, y ser articulada a la producción de pan llevar, quinua, papa, haba, en función de los limitantes edáficos. El IRD que trabajaba con el IBTA investigó durante dos ciclos 1994-95 y 1995-96, en cooperación con Yunta, los sistemas de labranza adaptados a suelos salinos y/o sódicos. Ya se había evaluado los efectos del subsolado en el altiplano central boliviano (Ramos, 1994, en Patacamaya) y parecía valioso adaptar estos conocimientos al lavado de sales en los suelos arcillosos de G. Villarroel. Se sembró en esta oportunidad dos especies de sistema radicular muy distinto, la quinua con raíz pivotante y la cebada con raíz fasciculada. El reto fue diseñar sistemas de cultivo con especies tolerantes anuales y luego forrajeras halófitas, en la medida que se pierde el efecto del drenaje localizado por el subsolado. Se probó la instalación de halófitas para recuperar suelos salinos sin uso, con la posibilidad de incorporarlas en la sucesión de cultivos.

La necesidad de aumentar la disponibilidad de agua, tanto para el consumo humano y de los animales, como para el riego, llevó a buscar diversas maneras de cosechar el agua de lluvia, la única realmente dulce en la provincia. El año 1997 Yunta inicia el Proyecto "Reducción del déficit hídrico de la Provincia Gualberto Villarroel mediante el aprovechamiento de las aguas superficiales por la construcción de micropresas y/o atajados". Este proyecto tiene como objetivo principal evaluar las posibilidades de atajar las aguas superficiales escurridas en época de lluvia, en micropresas con una finalidad de riego y en "cerradas", empleadas como abrevaderos para los animales.

Se ha identificado en la zona alta de la provincia (Primera Sección) 6 cuencas de ríos intermitentes que se forman en la época de lluvias:

1. Cuenca Jachha Challa Jahuira
2. Cuenca Achancarani
3. Cuenca Challa Jahuira
4. Cuenca Mulato de khari
5. Cuenca Llikapani
6. Cuenca Kochi.

En cada una de estas cuencas se mapearon mediante SIG (ILWIS) varias subcuencas y se calculó las características hidrológicas necesarias para estimar los caudales y realizar una modelización hidrológica (HCE-1). Para ello, se determinó para cada subcuenca la siguiente información: área,

perímetro, índice de compacidad, pendiente media, índice de pendiente, CN (Curve number), longitud del río principal, coeficiente de rugosidad; y se procesó los eventos mayores (> 20 mm) de las bandas pluviográficas de las estaciones de Patacamaya y Caracollo.

La subcuenca Kochi fue seleccionada como cuenca piloto, por su cercanía a la estación meteorológica Senamhi de Huayllamarca. Se realizó el aforo de los ríos de la subcuenca con ayuda del IHH y Senamhi. Con estas informaciones, se logró ubicar el sitio de una micropresa en Thola Pampa, que después de todas las investigaciones necesarias (levantamiento topográfico, estudio geológico, previsión de caudales), se encuentra actualmente en construcción. Se prevé un volumen de $30\,000\text{ m}^3$, para regar aguas abajo una superficie de 30 has.

Los estudios previos consisten en un levantamiento topográfico del vaso de la cerrada 1 mediante el programa Eagle Point y tres perfiles (fundaciones, material de préstamo y profundidad de excavación), calculándose las curvas: altura volumen para 3 sitios de la cerrada 1 y caracterizando la geología del vaso mediante un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) en la cortina de dicha cerrada. También se hicieron pruebas de infiltración en el eje de la cortina. Se calcularon los caudales mensuales y los volúmenes anuales de almacenamiento a partir de los datos de precipitación de las estaciones de Patacamaya y San José Alto para distintas cuencas (Sitio 1 a 3 y total). Se ajustaron los datos de precipitaciones máximas (24 horas) de las estaciones de Patacamaya, Caracollo y San José Alto a las leyes de distribuciones de Gumbel y Log Person – II y se determinaron las precipitaciones de tiempo de retorno de 50 y 100 años. Se seleccionaron los eventos máximos de las bandas pluviográficas de Caracollo y Patacamaya determinándose los histogramas con incrementales horarios. Además, se calcularon varios hidrógrafos de crecidas a partir de los histogramas de Caracollo extrapolados para tiempos de retorno de 50 y 100 años.

La construcción de 18 atajados o abrevaderos se hizo recién en la gestión 1999-2000, con el apoyo del proyecto "Seguridad alimentaria" de la Comunidad Europea, con un tiempo efectivo de 9 a 12 horas por atajado comunal (maquinaria TOPADORA DC-6). El objetivo es de conservar agua almacenada por lo menos tres meses después de finalizarse las lluvias. Tres tipos de cortina fueron diseñados en función del lugar y del tamaño del terreno (frontal, semicircular y tipo L). Más de 70% de los atajados tuvo un almacenamiento máximo debido a la apertura de canales de abducción construidos como aporte local de las comunidades. La cuenca de recolección estaba demasiado pequeña en Villa Potosí pero la comunidad no quiso cambiar de lugar. El fondo del

vaso de Quiricollo presentaba fisuras en el estrato limo-arenoso de estructura laminar. Se piensa ampliar esta experiencia, en el futuro, a unos 70 abrevaderos.

Dos tipos de enseñanza se pueden sacar de esta experiencia de construcción y manejo de atajados: técnica y social. La ubicación del atajado es decisiva para su funcionamiento óptimo, pero muy variable según la topografía, la textura del suelo de arcilloso a limoso. Además, la mayoría de las organizaciones comunales dotaron de terrenos no aptos y algunas familias se opusieron a la construcción en sus terrenos. 72% de los atajados llenaron su capacidad en la época de lluvias, logrando cubrir el consumo de aproximadamente 60 bovinos y 680 ovinos durante los tres meses que siguen el final de las lluvias. En la época seca, el déficit de agua es tal que el agua almacenada ha sido utilizada también para el consumo humano. Esta posibilidad de incrementar la oferta en agua ha motivado una mayor demanda para su construcción.

Esta preocupación por mayores fuentes de agua y de mejor calidad seguirá promoviendo nuevas investigaciones y nuevos intentos en el futuro. Por ejemplo, los intereses del proyecto ALT por el uso del agua para riego a partir del río Desaguadero han conducido recientemente (1998-2000) a estudiar la contaminación de los suelos por efecto del riego con aguas usadas provenientes de las minas. En cada fuente nueva de agua se articula un proyecto de producción. El número y el tamaño de los diferentes proyectos han ido creciendo. Una orientación futura es la consolidación de estas propuestas de producción gracias a oportunidades de comercialización y transformación. Se tropezó inicialmente con proyectos comunales, consiguiendo una mejor respuesta en proyectos familiares o de pequeños grupos de familias. Las investigaciones realizadas han permitido inventariar los recursos, conocer su calidad y dinámica, y encarar así de mejor manera las propuestas de mejoramiento productivo. Sin embargo, la difusión de estas propuestas requiere reforzar los niveles de organización campesina y tomar en cuenta en las futuras temáticas de investigación la gestión de los sistemas de riego por los productores. Esto será una condición para asegurar la sostenibilidad de las propuestas.

Desde 1996 hasta la fecha, se viene completando una caracterización de los sistemas de producción en las comunidades de la segunda sección de G. Villarroel, con Magda Camacho y luego Carla Guzman y Lourdes Vargas. Estas investigaciones serán muy necesarias, incorporando un componente económico, a la hora del funcionamiento efectivo de la regulación del sistema TDPS. Ahora que se han masificado las propuestas, la institución puede pensar en apoyarse en organizaciones de productores. A raíz de la ley de participación popular, los esfuerzos de planificación microrregional tuvieron bastante acogida de parte de los municipios. Una nueva etapa del desarrollo de la provincia sería la apropiación de los proyectos productivos por las organizaciones de productores y las municipalidades.

6.5. Conclusión

En la provincia Gualberto Villarroel, Yunta viene trabajando 17 años en temas de desarrollo, donde se han beneficiado más de 1300 familias en 63 comunidades de la primera y segunda sección de la provincia. Durante este período se ha trabajado en el aprovechamiento de recursos hídricos, mayormente subterráneos para consumo familiar y ganadero. Paralelamente se han realizado bastantes acciones orientadas al incremento de la producción forrajera con riego de alfalfa, cebada y cultivo en secano de pastos nativos como el kauchi.

Con relación a las perspectivas de riego con aguas del río Desaguadero, se prevé la necesidad de acompañamiento en el mejoramiento de la infraestructura de riego existente, para evitar conflictos de orden social. La construcción de una represa en el río Desaguadero y la planificación microrregional originan un abanico de preguntas que justifican nuevas investigaciones.

El manejo de agua será de vital importancia para impedir la degradación de las parcelas debido a un mal uso del agua para riego. En el caso del aprovechamiento de las aguas subterráneas, la necesidad de abastecimiento de agua puede llevar a una sobre explotación del recurso en el futuro, lo cual debe regularse mediante la evaluación de los niveles de aprovechamiento del recurso y la concientización de organizaciones y autoridades locales.

El apoyo del gobierno nacional a iniciativas de aprovisionamiento de agua para riego, deberá ampliarse al uso de agua existente en la zona, es decir aguas saladas como las del río Desaguadero y subterráneas, tomando en cuenta la calidad de los suelos a regarse y los cultivos a desarrollar. Yunta tiene la preocupación de ampliar la escala de su intervención, integrando los planes de desarrollo municipales en planes regionales. Quiere compartir esta nueva prioridad institucional con las instancias gubernamentales y convencer a los políticos sobre la factibilidad de desarrollar las provincias altiplánicas como Gualberto Villarroel.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES (D. Hervé, V. Orsag, R. Ledezma)

7.1. Replanteamiento de las afirmaciones iniciales

No podemos sino responder parcialmente las preguntas que nacen de los planteamientos iniciales, enumerados en la introducción. En todo caso, se puede reformular estas preguntas a la luz de lo que se sabe.

Afirmación 1: Si llueve menos de 400 mm por año, sólo con riego se puede producir.

Se puede producir cultivos anuales y forrajeros con precipitaciones comprendidas entre 300 y 400 mm, con técnicas de aridocultura, consumidoras de espacio físico. Las perspectivas de riego conciernen 15% del territorio. El área que se beneficiará del riego quedará muy reducida. Se tiene entonces que diseñar alternativas en cultivo de secano y en cosecha de aguas de lluvia escurridas, compatibles con suelos salinos. Las halófitas como el kauchi (*Suaeda foliosa*), y también las arbustivas forrajeras, podrían ser probadas en secano, en base a la experiencia de otros países (Australia, África del Sur, Israel, USA, etc.).

Afirmación 2: Las aguas del Desaguadero son demasiado salinas para poder usarlas para riego.

A diferencia de la salinidad del lago Titicaca, que queda bastante estable a pesar de la variabilidad de los aportes, el grado de salinidad del agua del río Desaguadero depende de dónde se capta el agua y de la época del año. La salinidad aumenta en la medida que la toma está alejada del lago Titicaca. La salinidad en la época seca es más alta que en la época de lluvia, por una dilución menor en el agua. Parece que la calidad de agua en los canales de riego principales no varía mucho en relación a la calidad del agua en la toma, salvo a la extremidad del canal más largo (23 km).

El riesgo de salinización resultante del riego con aguas salinas depende principalmente de la textura del suelo y de la composición del agua de riego. En algunos casos, se puede lavar suelos salinos con agua ligeramente salina. La textura es en general más arenosa y los suelos mejor drenados en Aroma, y los suelos más arcillosos e imperfectamente drenados en Villaroel. En todo caso, se debería mapear con precisión las áreas más favorables, con mejores tasas de infiltración y

drenaje. Hay que relacionar también los resultados de análisis de agua con los de suelo para poder definir dónde se puede regar, cómo se debe regar, con qué cantidad de agua y con qué frecuencia.

Si bien las aguas de riego presentan un riesgo moderado de sodicidad, las parcelas bajo riego durante varios años han mostrado contenidos en Na tres a cuatro veces mayores con respecto a las parcelas a secano. Podemos observar una tendencia de los suelos salinos a convertirse en suelos alcalinos (Solonchak en Solonetz). Si se continúa con el uso de esta agua el ESP de los suelos tenderá a aumentar causando la desagregación y dispersión de las partículas, lixiviación de las arcillas, disminución de la permeabilidad y toxicidad para las plantas. El aumento de la CE podrá afectar la productividad relativa de las parcelas. Para la alfalfa, a cada aumento de $1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ de la CE corresponde una disminución de 7.3% de la producción relativa (Bresler *et al.*, 1982).

Afirmación 3: Se puede duplicar el área actualmente bajo riego con el uso de aguas subterráneas.

La proporción del área irrigada con agua de bombeo es mínima. También la explotación mediante pozos y bombeo de las aguas subterráneas tiene sus límites según la profundidad de los acuíferos alcanzados; falta todavía evaluar con precisión, simulando diversos escenarios de extracción. Convendría evaluar la proporción del área total irrigable que es actualmente irrigada con aguas subterráneas, en comparación con el área que se beneficia de las aguas del río Desaguadero. En ambos casos, se tendría que evaluar el aumento potencial del área con riego, respectivamente con una gestión óptima de los acuíferos y con el funcionamiento de la represa construida en el exutorio del lago Titicaca. Este tipo de información ayudaría a preservar las posibilidades de aprovechamiento de las aguas subterráneas, tomando en cuenta los escasos recursos hídricos superficiales con que cuenta el altiplano boliviano. Sería también la base de una gestión concertada entre los usuarios tanto de estos acuíferos como del agua del Desaguadero.

Afirmación 4: El campesino no tiene experiencia de riego en la zona, o ésta es demasiado reciente.

El riego se inició en la provincia G. Villaroel en 1963, para regar cultivos introducidos, pero ya existían algunos canales desde 1952. La mayoría de los canales de riego que tienen su toma en el Desaguadero son inventariados pero no se conoce su intensidad de uso y, en caso de abandono,

no siempre están documentadas las razones de este abandono. Falta documentar también los costos y resultados de las primeras experiencias de riego por aspersión y por goteo, que fueron desarrolladas en base a técnicas importadas del vecino Chile. Sería muy útil poder comparar los sistemas de riego en cuanto a su eficiencia y a las reglas de gestión social del agua.

Afirmación 5: Las prácticas de riego inadecuadas son factores que coadyuvan a la salinización.

Se ha demostrado técnicamente que el uso de aguas salinas para el riego de suelos salinos puede disminuir los efectos de una salinización secundaria y la posible sodificación de los suelos, dependiendo de las características físico-químicas del agua y de los suelos. Las láminas de riego pesadas que normalmente aplican los usuarios ocasionan el lavado de la zona radicular de los suelos permitiendo el desarrollo de los cultivos. Con los resultados obtenidos se demuestra que la utilización del agua del río Desaguadero no puede ser vedada para el riego, pero si debe ser controlada y orientada para un manejo adecuado (Ledezma, 1995).

En el futuro se mantendría sólo un riego complementario para la instalación del cultivo. Para la alfalfa, se procede a riegos más continuos. Pero la alfalfa ha demostrado ser tolerante a los grados de salinidad del agua en equilibrio con la solución del suelo en las zonas con riego. Convendría documentar más ampliamente los resultados de producción esperados con alfalfa y los posibles mejoramientos en su manejo con riego. La evaluación del efecto acumulativo del riego en los suelos se tropieza con dificultades metodológicas debidas a la heterogeneidad textural de los suelos y la dificultad de encontrar las parcelas testigo idóneas.

Afirmación 6: El riego con aguas del Desaguadero contamina los acuíferos dulces.

El riego con aguas del Desaguadero no pone en peligro los acuíferos subterráneos. Los acuíferos subterráneos de los suelos salinos son mucho más salados que el agua proveniente del río Desaguadero. Por el movimiento de evaporación ascendente, la mayor cantidad de sales presentes en los suelos proviene de estos acuíferos. Por efecto del riego, se provoca más bien un efecto de dilución de las sales en los acuíferos. Esto parecería en contradicción con la observación que el agua bombeada de pozos es de mejor calidad que el agua superficial. En realidad, no se trata de los mismos acuíferos. Existen varias capas colgadas separadas por niveles arcillosos y los lugares

donde se bombea agua tienen aguas más dulces, como es el caso de los pozos para micro-riego en San José, Mariscal y Chapicollo (provincia G. Villaroel).

Afirmación 7: El agua del Desaguadero está contaminada con metales pesados, su uso es peligroso para el consumo humano.

El tema de la contaminación del agua potable por el sector minero sigue vigente, aún si el contenido en metales de las aguas del Desaguadero y si el análisis de suelos y plantas sometidos a riego no han demostrado hasta el momento concentraciones de elementos pesados que puedan ser considerados de riesgo para la salud humana o animal. Dentro de los metales, (1) Cu, Co y Zn; (2) el arsénico, y (3) el boro pueden alcanzar niveles calificados de tóxicos, y necesitan por esta razón un seguimiento especial. En el suelo, las arcillas y materias orgánicas juegan un papel de fijadores de los metales pesados. Los análisis en la vegetación son más difíciles de interpretar, en el estado actual del conocimiento en Bolivia. Falta precisar también las normas de toxicidad para el consumo humano.

7.2. Qué no se sabe?

Interacciones agua-suelo-vegetación

Según Porta *et al* (1994) los problemas que se pueden presentar en los suelos salinos por efecto del riego no se deben exclusivamente a la composición química del agua, sino que es importante comenzar a manejar el concepto de la “calidad agronómica del agua” (Aceves 1979) donde ya se consideran las interacciones que se pueden generar por la interacción suelo-agua bajo un clima determinado. Para poder realizar predicciones sobre el uso de las aguas de riego se deben considerar varios aspectos:

- Clima:

Precipitación, cantidad y modelo de distribución,
Evapotranspiración,
Vientos.

- Calidad química del agua:

Conductividad eléctrica y pH,
Contenido de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ : SAR),

Contenido de aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-}),

Contenido en Boro,

Contenido ocasional de elementos tóxicos y contaminantes, tales como metales pesados.

- Características físicas y químicas del suelo a regar:

pH, textura, materia orgánica, SAR, ESP;

Velocidad de infiltración, conductividad hidráulica;

Morfología del Perfil, estructura y porosidad,

Factores que afectan a la salinidad del agua (disolución o precipitación de los componentes del suelo en Carbonatos Ca-Mg, o en yeso).

- Cultivos a regar:

Tolerancia a la salinidad, al sodio o a elementos tóxicos, según la fase fenológica del cultivo.

- Método de riego y manejo del agua:

En razón de que los diferentes métodos de riego tienen diferente incidencia sobre la acumulación de sales en el suelo, es necesario indicar que con aguas de mala calidad el éxito o el fracaso dependerá sobre todo del método de riego empleado (caudales y frecuencia de riego), y en especial del empleo de una fracción del agua disponible para el lavado de las sales.

- Condiciones de drenaje:

Las condiciones de riego y drenaje son indisociables en la mayoría de los casos, aún cuando se utilizan aguas de buena calidad.

- Niveles freáticos y calidad del agua subterránea:

Determina las posibilidades de ocasionar salinización secundaria o, al contrario, el lavado de las sales.

Frente a tal lista de conocimientos necesarios, conviene tomar posición. En primer lugar estamos todavía lejos de integrar como se debería los componentes suelo, agua y plantas. En segundo lugar debemos reflexionar sobre qué conjunto de datos mínimos, correctamente articulados, serían indispensables para realizar un diagnóstico sobre las posibilidades de riego con aguas saladas, en las condiciones del altiplano boliviano. El desafío es claramente metodológico.

Las limitaciones que presenta la llanura fluvio lacustre del río del Desaguadero, a nivel edafoclimático y socioeconómico, no garantizan bajo condiciones de sequía la obtención de cosechas estables y rendimientos elevados, ni la siembra de dos o más cultivos al año que permitan pagar el costo de corregir el suelo (con la incorporación de enmiendas químicas o la implementación de sistemas de drenaje). Por otra parte, es difícil conseguir volúmenes apreciables y suficientes de agua de buena calidad para lavar el exceso de sales de los horizontes superficiales; sólo se consigue en un año con muchas precipitaciones. En estas condiciones, no es posible impulsar un desarrollo agropecuario sostenible en esta zona del Altiplano boliviano, con base a criterios tradicionales. Se propone entonces impulsar una “Agricultura Salina Sustentable”, para el uso de los recursos suelo y agua con concentraciones importantes de sales, pero antes de una más severa degradación (Report of the panel of the Board of Science and Technology for International Development, 1990).

Evaluación del impacto del riego

Es difícil aislar, en un suelo irrigado desde hace varios años, el efecto acumulativo de las sales traídas con el agua de riego, de muchos otros factores que pueden influir sobre las variables estudiadas.

En primer lugar, la técnica de riego debe ser la misma. En segundo lugar, la calidad de los suelos es muy variable, en particular los contenidos en arcilla y en materia orgánica en diferentes profundidades. Los resultados de las comparaciones no parecen muy nítidos hasta el momento. Cabe preguntarse qué parcelas se usan como testigo: parcela no cultivada (no cultivada este año o desde el mismo número de años o desde siempre); parcela cultivada sin riego el mismo número de años pero, de preferencia, con el mismo cultivo y en el mismo tipo de suelo. Resulta sumamente importante describir con mejor detalle el suelo de la parcela testigo, su localización y sus antecedentes de cultivo. En todo caso, se compara pares de parcelas, de 0 y 5 años, 0 y 10 años, y hasta 30 años con riego. Resulta difícil pensar encontrar en el mismo lugar y sobre el mismo tipo de suelo parcelas siempre cultivadas con riego y parcelas siempre cultivadas en sequía. Habría que alejarse suficientemente de un canal de riego para encontrar parcelas sin riego. Resulta también difícil imaginar una parcela de alfalfa no regada sin que haya una napa freática bastante cercana. En este caso, las situaciones que comparar deberían en todo rigor tener

no solamente el mismo tipo de suelo sino también la misma profundidad de napa freática y calidad del agua subterránea.

Si los análisis se limitan a comparar los contenidos de sales o de alguna variable, alcanzados a una profundidad dada, con los valores límites de tolerancia, no se toma en cuenta la dinámica de la sodificación entre los diferentes horizontes y se vuelve muy lejano pensar en poder realizar un diagnóstico. Las diferencias entre profundidades pueden deberse solamente a la época del estudio, por lo que es necesario precisar en cada caso la fecha de muestreo. Se ha demostrado que la distribución de la salinidad entre los diferentes horizontes cambiaba según las precipitaciones o según los riegos de inundación practicados al inicio del ciclo agrícola. Además esta redistribución depende de las capas filtrantes e impermeables presentes en el perfil de suelo.

Para monitorear los riesgos de salinización, falta adecuar las normas existentes a la misma zona del altiplano y contar con métodos de determinación y de claves de interpretación totalmente seguros. El análisis de suelos salinos y/o sódicos presenta una serie de dificultades. Se ha avanzado en el tema de los pre-tratamientos; hay que ser conscientes de que pueden ser causantes de otros errores. Se ha subrayado también la importancia de conocer la mineralogía de las arcillas, por sus consecuencias sobre el comportamiento del suelo hacia las sales y los metales pesados. En este caso, más tal vez que en otros tipos de suelos, no se jerarquizan e integran suficientemente los diferentes criterios de determinación de la calidad del agua. Cuál es el peso respectivo de las sales, el boro, el cloro, los metales pesados, la carga de sedimentos en la definición de la calidad del agua para riego? Recién empiezan a ser tratados los temas sobre los metales pesados. Parece imprescindible monitorear la calidad del agua mediante muestreos en el Desaguadero, seguimiento de pozos (base de datos georeferenciada), y una red de parcelas totalmente identificadas, localizadas y cuyo manejo se registra con precisión, para evaluar en el tiempo el riesgo de sodificación de los suelos. Estos seguimientos deberán apoyarse en indicadores y métodos de diagnóstico en laboratorio totalmente seguros y fiables.

Los riesgos de salinización no dependen solamente de la calidad del agua y del tipo de suelo sino también de las modalidades de riego. La aplicación de láminas de riego elevadas como las que se producen con el riego por inundación pueden alcanzar fácilmente los horizontes salinos y/o sódicos que se encuentran generalmente en los horizontes inferiores de los suelos del altiplano.

De esta manera, estas láminas de riego favorecen la dilución de sales pero también su acumulación posterior en la superficie del suelo (época seca del año). Por otro lado, láminas elevadas de riego pueden hacer ascender la napa freática y con esto acelerar los procesos de salinización.

De acuerdo a los trabajos realizados por Ledezma (1995) en G. Villarroel, y a los efectuados por Rocabado durante la gestión agrícola (1998-99) en el sector de Santa Ana y Veizán en Japo (El Choro), el riego aplicado por los agricultores a los suelos, al margen de facilitar el preparado del terreno y cubrir las necesidades de agua de los cultivos, sirve para diluir y disminuir la excesiva concentración de sales en la superficie del suelo y de esta manera garantizar la germinación de los cultivos sembrados. La eficiencia del lavado depende de la técnica del riego, antes y después de la siembra, por inundación no controlada, con surcos guía o en tablones, o por surcos en camellones. A largo plazo, Orsag y Miranda (2000) han observado en los suelos regados una tendencia a la acumulación de sales detectada por un crecimiento del PSI (Porcentaje de Sodio Intercambiable). Por consiguiente, esta situación debe ser motivo de preocupación considerando que en la zona existen numerosos sistemas de riego tradicional que utilizan las aguas del Desaguadero. También sería necesario considerar los trabajos de Goldberg & Shmueli (1973), que demuestran que el riego por goteo permite ampliar el uso de aguas salinas en comparación a otros métodos tradicionales de riego. Este aspecto llega a constituirse en un aporte para zonas con escasez de agua como las zonas áridas y semiáridas y con agua de mala calidad. No se ha logrado hasta ahora evaluar el efecto de cada método de riego sobre la salinización y alcalinización de los suelos en condiciones locales.

De plantas tolerantes a sucesiones de cultivo sostenibles

Investigaciones llevadas a cabo en Israel (desierto del Negev) muestran que es posible producir tomates para conservas con aguas subterráneas, donde la conductividad esta entre 4 a 7 dS/m, mientras que Miyamoto (1984) reporta la producción comercial de alfalfa y tomates con aguas de riego cuya conductividad eléctrica es de 3 a 5 dS/m. Ahora bien, lo que se consigue en suelos arenosos, no siempre se puede lograr en suelos de textura fina. Reportes de Aronson (1985; 1989), Boyko (1966), Eptein (1983; 1985), Callagher (1985), Glenn and O'Leary (1985), Iyengar (1982), Pasternak (1987), Somers (1975) y Yensen (1988) indican que se han producido granos, semillas de

oleoginosas, pastos, árboles, arbustos forrajeros, arbustos energéticos, y una variedad de fibras y productos para farmacias, usando aguas de riego con alto contenido de sales. Los rendimientos alcanzados bajo condiciones salinas son comparables en algunos casos a los obtenidos con cultivos sensibles a las sales en suelos no salinos.

Considerando que los cultivos son más sensibles a las sales durante la germinación de las semillas, se ve por conveniente en esta etapa utilizar, para la siembra e implantación de algunos cultivos, aguas con menor contenido de sales. La siembra en el Altiplano boliviano durante la época lluviosa (Diciembre y Enero) de la alfalfa y otros cultivos, permite contar en esta época del año con menores concentraciones de sales y por consiguiente garantizar la germinación. Como algunos cultivos presentan en general mayor tolerancia a las aguas salinas cuando ya se encuentran en estados vegetativos o reproductivos más avanzados, se puede luego utilizar aguas con mayor contenido de sales (época seca del año). Esta práctica la realizan normalmente los usuarios de las aguas del río Desaguadero, en los diferentes sistemas de riego durante los meses de Junio a Octubre para regar los cultivos de alfalfa. En esta época del año las aguas alcanzan una conductividad eléctrica de aproximadamente 4 dS.m^{-1} .

Yensen (1988) indica que muchas de estas especies tienen una pobre calidad agronómica, por consiguiente presentan una amplia variabilidad en la germinación y maduración (aspectos no deseables en una agricultura convencional). Varios pastos tolerantes a las sales tienen semillas que requieren un tratamiento previo para lograr su germinación. Además, es necesario realizar algunos estudios para conocer si no contienen algunas sustancias tóxicas para los animales y el hombre. Por otro lado, es importante para el Altiplano buscar también que estas especies tengan una alta tolerancia a las heladas.

En el Altiplano boliviano existen plantas forrajeras nativas como el kauchi (*Suaeda foliosa*) y el atriplex (*Atriplex ssp.*) y cultivos como la quinua (*Quenopodium quinoa* Willd), que se desarrollan en medios adversos de suelos (salinidad y sodicidad) y también de clima (heladas, sequías), produciendo alimentos y forrajes con alto valor proteico para el hombre y los animales. Faltan referencias en la zona de la tolerancia a las sales de los otros cultivos de las rotaciones como papa, cebada, haba, cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), para poder diseñar sucesiones de

cultivo adaptadas a niveles crecientes de salinidad en el suelo. El problema es entonces encadenar varios cultivos o, tal vez, cultivos y halófitas forrajeras, de manera a construir sucesiones de cultivo sostenibles.

Sin embargo, debido al avance de la salinidad y sodicidad en los suelos de la llanura fluvio-lacustre, es conveniente no sólo disponer de material genético tolerante, sino también monitorear los umbrales de concentración de sales y sodio, encima de los cuales resulta peligroso introducir ciertas especies.

Manejo de Suelos

Al margen de la tolerancia de algunas especies a la salinidad, se debe considerar dentro de una agricultura salina el manejo el suelo para influir en la distribución y dinámica de las sales.

- Enmiendas químicas

Los suelos alcalinos de algunas partes del mundo generalmente son corregidos con ayuda de enmiendas químicas, pero este costo de recuperación no se puede asumir en el Altiplano boliviano. Sin embargo, la fuente de calcio necesaria para reemplazar el sodio intercambiable podría provenir del yeso, contenido en forma natural en los suelos de la zona. También los cationes bivalentes (calcio y magnesio) contenidos en el agua de riego (Desaguadero) podrían disminuir los procesos de salinización/alcalinización al mantener la estructuración de los suelos, con consecuencias sobre sus permeabilidad y aeración.

- Trabajo del suelo

Todo relieve superficial que concentra el agua contribuye a un mejor lavado localizado de las sales. Es el caso de la siembra en camellones. De esta manera, se puede realizar la siembra de cultivos tolerantes en las pendientes de los camellones, donde la acumulación de sales es menor que en la parte superior y en el surco. Por ejemplo, la remolacha forrajera se siembra normalmente en suelos salinos en los EUA mediante un camellón de 13 a 15 cm de alto. Protege las semillas sembradas de un secado rápido y de las sales que se acumulan en los lugares más altos de los camellones; posteriormente, antes de que las plantas formen tallos largos, una situación no deseada en la remolacha, se quitan los camellones. Su adaptación a las zonas lecheras del Altiplano fue probada con éxito en Viacha (Ibten) por Orság (1987).

En la provincia G. Villarroel del departamento de La Paz, los agricultores utilizan, para la siembra a secano, el cultivo en zanjas que permite aumentar la cantidad de agua escurrida, captada para el cultivo. Conviene definir experimentalmente la distancia entre zanjas para "cosechar" suficientemente agua y, de esta manera, desplazar y mantener a las sales diluidas. Se podría mejorar este sistema combinándolo con subsolado, para mejorar el drenado localizado, a la vertical de la zanja creada con discos. En suelos arcillosos, se ha demostrado que es posible usar un solo brazo de subsolado si la potencia del tractor no supera los 80 HP. En este caso, un cálculo económico debe decirnos si esta tecnología está al alcance del agricultor. También se recomienda completar la evaluación con una optimización de la fecha del subsolado en relación a las primeras lluvias, de manera a adecuar la migración de las sales con el desarrollo radicular. Se ha combinado en un ensayo de rehabilitación de pradera degradada de alfalfa un subsolado a 30 cm (Quisbert, 1997) con la incorporación de estiércol al suelo con yunta (mínimo de 7 t/ha). Lo que se propone con la subsoladora es la incorporación del guano dentro del dren fabricado con esta herramienta para aumentar su longevidad en los suelos arcillosos y limo-arcillosos. Se ha incorporado un artefacto permitiendo echar guano en el mismo surco pero no ha sido probada todavía la subsoladora así equipada.

Sistemas de drenaje más formales tienen limitaciones económicas. Chipana (1993) probó en invernaderos para hortalizas un sistema de drenaje con tubos de arcilla de fabricación local, a 30 cm de profundidad, que podrían ser tal vez remplazados por tubos de PVC. En un suelo franco-arcilloso, se consiguió un buen lavado de sodio, reduciendo la conductividad eléctrica equivalente C_{Ee}, de 21.4 ds m⁻¹ a 3.27 ds m⁻¹, con una eficacia del lavado del orden de 70%. Pero la cantidad y frecuencia del riego no permitieron un lavado del boro que presentó niveles de toxicidad. Faltan experimentaciones de técnicas de drenaje en parcelas de agricultores.

7.3. Propositiones de investigación orientadas al manejo sostenible de los recursos suelo, agua y vegetación

Considerando la magnitud del problema de salinización/alcalinización en el Altiplano Central de Bolivia, y ante la necesidad de consolidar una Agricultura Salina para un uso racional de los

recursos suelo, agua y vegetación, es necesario contar con un Centro de Investigaciones, encargado de centralizar los trabajos de investigación en este campo. Proponemos para este futuro centro las siguientes prioridades de investigación.

- *Precisar a mayor escala los estudios de suelos* de las zonas más aptas para riego. Las imágenes satélites permiten diferenciar el cuaternario lacustre y fluvio-lacustre. Se debería realizar mapeo de suelos salinos en zonas estratégicas, a escala de semi-detalle a detalle y precisar o ampliar algunos aspectos: la selección de un sistema adecuado de clasificación de suelos salinos, la determinación del contenido de yeso en los diferentes horizontes y de los límites de retención de metales en los suelos de la llanura, el uso como indicador de la concentración crítica de coagulación.
- *Evaluar la incidencia de diferentes prácticas de manejo de suelos* (existentes como la siembra en camellones, zanjas, o nuevas) y *métodos de riego en la disminución de los riesgos de salinidad y sodicidad.*
- *Monitorear la cantidad y la calidad de las aguas del río Desaguadero*, en todo su recorrido, en forma periódica y sistemática, antes y después de que las obras de regulación estén concluidas. Las variaciones del caudal del Desaguadero son mal conocidas desde el exutorio del lago Titicaca hasta los lagos Uyuni y Poopó, en comparación con lo que se sabe sobre el lago Titicaca.
- *Completar la evaluación de la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas y de su nivel de extracción:* profundidad, volumen, frecuencia de bombeo y caudales extraídos con la finalidad de definir reglas de uso. La modelización de los flujos de agua y sales desde las napas freáticas debería poder integrar en el futuro simulaciones de diferentes lugares y tasas de extracción por bombeo. Conviene también consolidar la metodología empleada para caracterizar la calidad del agua, definiendo el conjunto mínimo de análisis necesarios.

- *Monitorear el avance de la salinidad /alcalinidad en los suelos de la llanura*, después de consolidar las metodologías a utilizar en los estudios diacrónicos, y relacionarlo con las técnicas de cultivo y de riego.
- Recopilar y analizar los trabajos, *experiencias y resultados con especies tolerantes a suelos salinos y alcalinos en Bolivia* (Kauchi, Atriplex, etc.) *y en otras partes del mundo*. En base a la experiencia adquirida con el Kauchi, se fomentará en primer lugar la recolección de material vegetativo y semillas de plantas tolerantes a la salinidad (nativas e introducidas), de zonas con diferentes grados de salinidad y alcalinidad en el Altiplano boliviano. Con ello, se podría crear un banco de germoplasma de semillas de plantas halófitas, incluyendo material genético del exterior (ej. Universidad de Tucson-Arizona) tolerante a sequías, heladas e inundaciones periódicas. Se procederá a la evaluación participativa del comportamiento de las especies introducidas (en particular alfalfa, remolacha forrajera) y nativas en ensayos multilocales (La Paz, Oruro), prestando una atención particular a la siembra (germinación, multiplicación y siembra), según tipos de suelo, niveles de salinidad/sodicidad y riesgos climáticos. Se hará un análisis bromatológico de las especies estudiadas para evaluar las potencialidades de las especies promisorias para su uso como forrajes, alimentos, energía, así como evaluaciones económicas de costos de producción y manejo.
- *Completar la inventariación y mapeo de los sistemas de riego* tradicionales de la llanura fluvio-lacustre del Desaguadero, *especialmente en su rivera izquierda* y confrontar esta información con los mapas actualizados y detallados de suelo para lograr una zonificación de posibles usos de la tierra. Asimismo, falta conocer los logros y limitantes del manejo del riego por las comunidades en esta zona.
- *Monitoreo del impacto de la represa*
No está cuantificada la proporción de la superficie total cultivable que se podría regar adicionalmente, luego de la construcción de la represa a la salida del lago Titicaca. No se conoce el impacto de la represa sobre el futuro cauce del río, la localización de las tomas de los canales y sus riesgos respectivos de sedimentación. Se tendría que comprobar hasta qué nivel de dilución de las sales se llegará, en la época de estiaje, con la construcción de la represa.

- *Realizar un estudio socioeconómico* de la zona de interés a nivel más detallado, para determinar las posibilidades reales de implementar ciertas prácticas. Este campo ha sido muy poco explorado hasta la fecha pero tiene prioridad en la etapa de concertación con los usuarios que se abre con la finalización de la represa. Asimismo es necesario tener un estudio de mercado en las ciudades y poblaciones aledañas para los productos tradicionales y los productos lácteos o derivados de la ganadería debido al crecimiento de la lechería en la zona (caso El Choro, Chilahuala y Aroma).

7.4. Manejo institucional

Para lograr un manejo sostenible de una agricultura salina en la llanura, conviene tomar en cuenta aspectos fuera de la agricultura y fuera de la llanura fluvio-lacustre del Desaguadero.

Gran parte de los contaminantes y de los sedimentos provienen de la parte alta de la cuenca del lago Titicaca. Es necesario buscar algunas soluciones a estos problemas, en forma integral. Conviene recordar, por ejemplo, que se usa mucha agua para riego en el lado peruano de la cuenca, cuando se frena aparentemente el uso de agua salada del lado boliviano. Asimismo, los problemas de contaminación de aguas, que se dan en la cuenca por la actividad minera, afectan a suelos, cultivos y praderas. Es necesario contar con mecanismos y herramientas que ayuden a controlar la contaminación por efluentes y aguas de desecho provenientes de las minas o ingenios, y de esta manera no sólo se va a atacar los problemas sino también las causas. Existe un mecanismo de concertación binacional sobre el uso de las aguas de la cuenca del lago Titicaca, A.L.T. Pero sería necesario contar también con una Ley de Aguas aprobada en Bolivia.

Si bien a nivel internacional se han desarrollado una serie de experiencias y tecnologías que permiten recuperar y habilitar las tierras afectadas por contenidos de sales o sodio para la producción agropecuaria, éstas se refieren más a países desarrollados donde las condiciones socioeconómicas de los productores no son una limitante ya que el costo de algunas prácticas es bastante elevado. Se piensa entonces orientar las consultorias internacionales necesarias hacia los problemas técnicos de diagnóstico, de monitoreo mediante indicadores, y de soluciones no

costosas de recuperación de suelos. Lo que finalmente hace más falta es una concertación muy amplia sobre el uso del agua del Desaguadero, y su calidad, entre los diferentes agentes económicos de la cuenca. La inversión en infraestructura de riego y drenaje, además de buscar rentabilidad económica, debe incorporar las necesidades de solución y las demandas de los grupos sociales que habitan las zonas afectadas por la salinidad, y contribuir de manera significativa en la producción de alimentos para las grandes urbes de La Paz y Oruro.

Los puntos de vista prejuiciosos sobre el potencial de esta parte del altiplano boliviano y los riesgos del riego van siendo paulatinamente aclarados pero sin lograr aún cambios en las decisiones políticas para un apoyo al desarrollo de infraestructuras de riego en estas zonas. Falta de una institución piloto líder en la investigación participativa, para lograr el manejo adecuado de aguas, suelos, cultivos y monitorear periódicamente la calidad de las aguas y la salinidad de los suelos (PACII, 1996). Los casos de desarrollo, presentados en este libro, demuestran el potencial productivo de la zona, tanto en praderas forrajeras, como en el cultivo de quinua, que es a la vez fuente de trabajo y de ingresos para el poblador del lugar. No se podría conseguir una situación equivalente si la provincia se convirtiera en una zona de protección ambiental.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVES, E., 1979. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. México, Colegio de post-grado de Chapingo, 382 p.
- AGUILAR, J., 1993. Capacidad de uso agrícola y forestal de los suelos Alpujara. II Congreso nacional de Ciencia del Suelo, Sevilla, España, pp. 291-296.
- AGUILAR -RUIZ, J., et al. 2000. Contaminación de Suelos por Vertidos Tóxicos Mineros en el Entorno del Parque Nacional de Doñana (Sevilla, España). Conferencia en 14 Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 8-12 de Nov., Pucón, Chile.
- ALLISON, L., BROWN, J., HAYWARD, H., RICHARDS, L., 1993. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sodicos. USDA, Ed. Limusa, 7 ed., 4-8, 72 p.
- ALZERRECA, H., 1987. Campos Nativos de Pastoreo de la Zona Altiplánica y Alto Andina de Bolivia. In: Primera Convención Nacional en Producción de Camélidos Sudamericanos. Oruro, Bolivia, CORDEOR, pp. 155-191.
- ALZERRECA, H. & LARA, R., 1987. Evaluación de praderas nativas en el Altiplano central y oeste del departamento de Oruro. In: Primera reunión nacional en praderas nativas de Bolivia. Oruro, Bolivia, CORDEOR-CEE-PAC.
- ALZERRECA, H. & PRIETO, G., 1990. Diagnóstico de las actividades forrajeras en el Altiplano alto andino de Bolivia. In: Pastizales andinos, importancia, producción y mejoramiento. Cochabamba, Bolivia, REPAAN-CIF-UMSS-IBTA-REBOFU.
- ALLISON, L. E., 1993. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. México, Ed. Limusa, 7 ed., 172 p.

- ARAGON, C. M., 1985. Estudio de tolerancia y susceptibilidad del trigo a la salinidad y algunos mecanismos de adaptación. Chapingo, México, 142 p.
- ARORA, H. S., & COLEMAN, N.T., 1979. The influence of electrolyte concentration on flocculation of clay suspensions. *Soil Sci.*, **127**: 134-139.
- AUBERT, G., 1995. La morphologie des sols affectés par le sel, reconnaissance et prévision-surveillance continue. Roma, Italia, *FAO Soils Bulletin*, **31**: 187-194.
- AYERS, A.D., 1952. Germination as affected by soil moisture and salinity. *Agronomy J.*, **44**: 82 - 84.
- AYERS, R.S. & TANJI, K.K., 1981. Agronomic Aspect of Crop Irrigation with Waster Waster. Proc. Spec. Conf. Water Forum, 81.
- AYERS, R.S. & WESCOTT, D.W., 1987. Water quality for agriculture. Roma, Italia, FAO Irrigation and drainage paper N° 29, 174 p.
- BASSLOVSKAYA, S.S. & SYROESHKINA, M., 1945. Influence of the chloride ion on the content of chlorophyllin the leaves of the potatoes. *Plant Physiol.*, **11**: 149-158.
- BERNSTEIN, L., 1961. Salt-affected soils and plants. In UNESCO Simposio, 1960, Paris, 139 p.
- BILLS, B.G., DESILVA, S.L., CURREY, D.R., EMENGER, R.S., LILLQUIST, K.D., DONNELAN, A. & WORDEN, B., 1994. Hydro-isostatic deflection and tectonic tilting in the Central Andes - Initial results of a GPS Survey of lake Minchin Shorelines. *Geophys. Res. Lett.* **21** (4): 293-6.
- BOHN, N.L , et al. 1985. Soil Chemistry. Nueva York, John Wiley, 341 p.

- BOOKER, 1991. Tropical soil manual. London, J.R. Landon Ed.
- BOSQUE, H., 1998. Ecophysiological analysis of drought and salinity stress on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). M.Sc. tesis, University of Ghent, Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, International Center for Eremology, Bélgica, 122 p.
- BOSQUE, H., 2000a. Estudio de factibilidad para el desarrollo del Altiplano Central Sector La Paz, provincias Pacajes y Gualberto Villarroel. La Paz, Bolivia, Ing. Agr. de la UMSA – JICA, 93 p.
- BOSQUE, H., 2000b. Determinación de la calidad de las aguas subterráneas de Nor Lipez (Potosí), para fines de riego por goteo del cultivo de quinua. Consultoría para la Unidad Operativa de Apoyo y Fortalecimiento (UTOAF) del Sistema Nacional de Defensa Civil.
- BOURGES, J., CORTES, J., SALAS, E., 1991. El potencial hídrico del lago. In C. Dejoux y A. Iltis (eds.): El lago Titicaca. La Paz, ORSTOM-HISBOL, pp. 533-545.
- BOWER, C.A., REITEMEIER, R.F., FIREMAN, M., 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Sci.*, **73** : 251-261, Illus.
- BRESLER, E., Mc NEAL, B., CARTER, D., 1982. Saline and sodic soils. Springer-Verlag, 236 p.
- BUSTAMANTE Z. & RUIZ R., 1988. Nutrientes del Kauchi (*Suaeda foliosa*), forrajera del Altiplano Central de Bolivia. *Ecología en Bolivia*, N°12, La Paz, noviembre 1988, 29-37.
- CAMACHO, V. & QUINTANILLA, J., 1994. Estudio preliminar de las aguas subterráneas de la provincia Aroma del departamento de La Paz. La Paz, Bolivia, Informe final, IIQ-UMSA, 83 p.

- CAMILION, M.C. *et al.*, 2000. Componentes Coloidales y Retención Metálica en Suelos del Nordeste Bonaerense-Argentina. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 8-12 de Nov., Pucon, Chile, Panel.
- CANOVAS, J., 1986. Calidad agronómica de las aguas de riego, Madrid, 51 p.
- CARI, A., 1978. Efectos de la salinidad y fertilización potásica en dos variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). Tesis Grado Ing. Agr., Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 66 p.
- CARMOUZE, J.P., AQUIZE, E., 1981. La régulation hydrique du lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, **14 (4)**: 311-328.
- CARMOUZE, J.P., AQUIZE, E., ARZE, C., QUINTANILLA, J., 1983. Le bilan énergétique du lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, **16 (2)**: 135-144.
- CARMOUZE, J. P., ARZE, C., QUINTANILLA, J., 1978. Circulación de materia (agua-sales disueltas) a través del sistema fluvio-lacustre del Altiplano; la regulación hídrica e hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, Vol. X, N° 1: 49-68.
- CARMOUZE, J. P., ARZE, C., QUINTANILLA, J., 1981. Régulation hydrochimique du lac Titicaca et l'hydrochimie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, **14 (4)**: 329-348.
- CASANOVAS, M., PACHECO, P., VELASCO, C., 1990. Diagnostico socioeconómico de la provincia Gualberto Villarroel. La Paz, Bolivia, AIPE/PROCOM-CEDLA, Serie de estudios micro regionales No 2, 94 p.
- CENTRO DE PROMOCION Y COOPERACIÓN YUNTA, 1994. Recuperación de suelos salinos ido sódicos mediante el establecimiento de praderas de Kauchi para su

incorporación en los sistemas de pastoreo de la zona baja de la provincia Gualberto Villarroel (Proyecto). La Paz, Bolivia, 160 p.

CENTRO DE PROMOCION Y COOPERACIÓN YUNTA, 1994. Prospección geoelectrica en la provincia Gualberto Villarroel; zonas intermedias y bajas. La Paz, Bolivia.

CEPEDA DOVALA, J., 1991. Química de suelos, México, Ed. Trillas, 2 ed. , pp. 138-151.

CHAPMAN, H.D., 1973. Cation Exchange. In C.A. Black et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Am. Soc. of Agron., Inc. , Madison, USA, *Agronomy*, **9**: 891-901.

CHIPANA, R., 1993. Manejo de aguas y suelos salinos en ambientes atemperados. Tesis de Grado, Ing. Agr. , Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 208 p.

COLQUE, E., 1987. Estudio de factibilidad del proyecto de riego El Choro. CEE-CORDEOR, Oruro, Bolivia.

COLQUE, J., 1998. Evaluación de la capacidad de extracción y tolerancia de kauchi (*Suaeda fructuosa*, Moq) a diferentes niveles de sodio. Tesis de grado, Ing. Agr. , Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 161 p.

COLQUE, J., 2001. Evaluación de la capacidad de extracción y tolerancia de kauchi (*Suaeda fructuosa* Moq.) a diferentes niveles de sodio. In: Memorias I Congreso Boliviano de la Ciencia del Suelo, La Paz, Bolivia, pp. 170-180.

COTTENIE, A., VERLOO, M., KOEKENS, L., VELGHE, G., CAMERLYNCK R., 1982. Chemical analisis of plants and soils. Laboratory of Analysis and Agrochemistry, State University, Ghent, Belgium, pp. 34-35.

COUDRAIN-RIBSTEIN, A., GARCIA, B., POUYAUD, B., GALLAIRE, R., JUSSERAND, C., QUINTANILLA, J., CAHUAYA, D., 1997. Existe memoria de los 10000 últimos años en

el acuífero del Altiplano Boliviano. In: Coloquio Internacional Recurso Agua en los Andes; su gestión en la II región de Chile, 10-13 de junio, Eds. UNC-ORSTOM, Antofagasta, Chile, pp. 38-39.

COUDRAIN-RIBSTEIN, A., LOOSMORE, T., ROCHAT, Ph., QUINTANILLA, J., YOUNGER, P., 1995. Use of a groundwater model in assessing possible sources of salinity on the central Bolivian Altiplano. In: Models for Assessing and Monitoring Groundwater Quality, Proceedings of a Boulder Symposium, July 1995, IAHS, Pub. N° 227: 11-19.

COUDRAIN-RIBSTEIN, A., OLIVE, Ph. , QUINTANILLA, J., SONDAG, F., CAHUAYA, D., 1995. Salinity and isotopic dynamics of the groundwater resources in the Bolivian Altiplano. In Application of tracers in Arid Zone Hydrology, proceedings of the Viena Symposium, August 1994, IAHS Pub. N° 232: 267-275.

COUDRAIN-RIBSTEIN, A., PRAXT, B., QUINTANILLA, J., ZUPPI, G.M., CAHUAYA, D., 1995. Salinidad del recurso hídrico subterráneo del Altiplano Central. *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines*, **24 (3)**: 483-493.

COUDRAIN-RIBSTEIN, A., PRAXT, B., QUINTANILLA, J., ZUPPI, G., JUSSERAND, C., CAHUAYA, D., 1995. La salinité de la ressource en eau souterraine de l'Altiplano Central. In P. Ribstein, B. Francou (Eds.): Actas del Seminario Internacional Aguas, Glaciares y Cambios Climáticos en los Andes Tropicales, La Paz, ORSTOM-UMSA-SENAMHI-CONAPHI, pp. 97-108.

COUDRAIN-RIBSTEIN, A., PRATX, B., TALBI, A., JUSSERAND, C., QUINTANILLA, J., CAHUAYA, D., 1997. Bilan et évaporation d'un aquifère en zone aride, Altiplano Central Bolivien. *Hydrochemistry IAHS*, Pub. No 30: 1-11.

COUDRAIN-RIBSTEIN, A., PRAXT, B., TALBI, A., JUSSERAND, C., 1998. Is the evaporation from phreatic aquifers in arid zones independent of the soil characteristics? *C.R. Acad. Sci. Paris (II)* **326** : 159-165.

COUDRAIN-RIBSTEIN, A., TALBI, A., LEDOUX, E., RIBSTEIN, P., de MARSILY, G., 2000. Changements climatiques et recyclage sur plusieurs milliers d'années du chlorure entre lacs et eau souterraine, exemple de l'Altiplano bolivien. AISH, Liège, Belgique, Conf. 23-26/05/2000.

CROSS, S.L., BAKER, P.A., SELTZER, G.O., FRITZ, S.C. & DUNBAR R.B., 2000. A new estimate of the Holocene lowstand level of the lake Titicaca, central Andes, and implications for tropical paleohydrology. *The Holocene*, **10**: 21-32.

DARAB, K., 1995. Laboratory analyses of soils related to the prognosis and monitoring of salinity and alkalinity. Roma, Italia, *FAO Soils Bulletin*, **31**: 147-157.

DINCHEV, D., 1972. Agroquímica. La Habana, Cuba, Univ. De la Habana, Facultad de Ciencias Agropecuarias, ed. Revolucionaria, 280 p.

DRIESSEN, P., & DUDAL, R., 1991. The major soils of the world. Agricultural University of Wageningen, Katholieke Universiteit Leuven, 310 p.

DUCHAUFOR, P., 1991. Pédologie. Sol, végétation, environnement. Paris, Masson, 3^{ème} édition, 289 p.

DUFÉY, J., 1992. Pédologie, Diffusion universitaire CIACCO, tome 2.

DUFÉY, J., LAUDELOUT, H., GOBRAN, G., 1982. The use of gypsum for preventing soil sodification: effect of gypsum particle, size, and location in the profile. *Journal of Soil Science*, 309-316.

- DUFFY, C.J. & AL-HASSAN, S., 1998. Groundwater circulation in a closed desert basin: topographic scaling and climatic forcing. *Water Resour. Res.*, **24**: 1675-1688.
- EPSTEIN, E., 1983. Crops tolerant of salinity and other stresses. In: Better crops for food, Pitman Books, London, UK, pp. 61-82.
- FAN, Y., DUFFY, J. & OLIVER, D.S., 1997. Density-driven groundwater flow in closed desert basins : field investigations and numerical experiments. *J. Hydrology*, **196**: 139-84.
- FAO, 1976. Esquema para la evaluación de tierras. *Boletín FAO*, **32**.
- FAO, 1977. Directives pour la description des sols, 72 p.
- FAO, 1989. Water quality for agriculture, Irrigation and Drainage. Rome, Italy, FAO, Paper 29 (1), 174 p.
- FAO-UNESCO, 1989. Carte mondiale des sols, légende révisée, 125 p.
- FASSBENDER, H.W., 1975. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 398 p.
- FIREMAN, M., & WADLEIGH, C.H., 1951. A statistical study of the relation between pH and the exchangeable sodium percentage of western soils. *Soil. Sci.*, **71** : 273-285, Illus.
- FLORES, M., 1994. Conséquences pédochimiques de la irrigation des sols par les eaux de la rivière Desaguadero (Altiplano Bolivien). Louvain la Neuve, Belgique.
- FLOWERS, T.J., HAJIBACHERI, M.A., CLIPSON, N.J., 1986. Halophytes. University of Sussex, *The Quarterly Review of Biology*, Vol. 61, N° 3 : 313-337.

- FLOWERS, T. J. & YEO, A. R., 1986. Ion relations of Plants under Drought and salinity. In: Australian Journal of Scientific Research, Melbourne, Australia, 75-91 p.
- FREDERIC, D., 1994. Water resource development in provincia Villarroel, Bolivian Altiplano. Tesis MSc., Department of Civil Engineering, University of New Castle Upon Tyne, USA, 80 p.
- GARABITO, M., SANDY, X., de QUEIROZ, J., CUESTA, M., 1995. Estudio sinecológico de las poblaciones de *Salicornia pulvinata* y *Antrobryum triandrum* en los campos nativos de pastoreo del canton San José Llanga (provincia Aroma del departamento de La Paz). La Paz, Bolivia, IBTA 166/BOLETIN TECNICO 45/ SR-CRSP 32/1995. MACA/IBTA/USAID/SR-CRSP, 41 p.
- GARCIA, M., 1991. Análisis del comportamiento hídrico de dos variedades de quinua frente a la sequía. Tesis Ing. Agr. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 126 p.
- GARFIAS, J., ANDRE, C., LLANOS, H., ANTIGUEDAD, I., 1995. Simulación de crecidas en la cuenca del río Desaguadero. *Bull Inst. Fr. Etudes andines*, **24 (3)**: 449-460.
- GERARD, G., 1992. Biométrie. Diffusion Universitaire CIACCO, Louvain-La-Neuve, Belgique.
- GOLBERG, S. & FOSTER, H.S., 1990. Flocculation of reference clay and arid-zone soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54** : 714-718.
- GOODE, D.J., 1996. Direct simulation of groundwater age. *Water Resources Res.*, **32 (2)**: 289-96.
- GREENE, R.S.B. *et al.*, 1978. A study of the coagulation of montmorillonite and illite suspensions by calcium chloride using electron microscope. In W.W. Emerson *et al.* (Ed.) : Modification of soil structure. New York, John Wiley & Sons, pp. 35-40.

GUÉRIN, R., DESCLOITRES, M., COUDRAIN-RIBSTEIN, A., RAMIREZ, E., 1999. Sondeos electromagnéticos en el dominio de tiempos (TDEM) en Bolivia (en el Altiplano central y en el Salar de Uyuni). In: Jornadas sobre Actualidad de las Técnicas Aplicadas en Hidrogeología, Granada, España.

GUERRERO-CAMPO, J., ALBERTO, F., HODGSON, J., GARCIA-RUIZ, J., MONTSERRAT-MARTI, G., 1999. Plant community patterns in a gypsum area of NE Spain I. Interactions with topographic factor and soil erosion. *Journal of Arid Environments*, **41**: 401-410.

GUERRERO-CAMPO, J., ALBERTO, F., MAESTRO, M., HODGSON, J., MONTSERRAT-MARTI, G., 1999. Plant community patterns in a gypsum area of NE Spain II. Effects of ion washing on topographic distribution of vegetation. *Journal of Arid Environments*, **41**: 411-419.

GUMIEL, D., 1988. Prospección hidrológica del area altiplánica del PMPRII. La Paz, Bolivia, CEE-CORDEPAZ, 92 p.

GUYOT, J.L., GUMIEL, D., 1990. Premières données sur l'hydrogéologie et l'hydrogéochimie du Nord de l'altiplano bolivien. *Hydrogéologie*, **3** : 159-164, 7 fig.

GUYOT, J.L., ROCHE, M.A., NORIEGA, L., CALLE, H., QUINTANILLA, J., 1990. Salinities and sediment transport in the Bolivian Highlands, *J. Hydrol.*, **113** : 147-162.

HAM PAPEL PAMPA-YUNTA, 1996, Diagnóstico Socioeconómico de la Segunda Sección Papel Pampa, provincia Gualberto Villarroel. La Paz, Bolivia. 197 p.

HARRIES, E., 1915. Effect of alkali salts in soils on the germination and crops.

HAYWARD, H.E. & WADLEIGH C.H., 1949. Plant growth on saline and alkali soils. *Advances in Agronomy*, **1**: 1-38.

- HENIN, S., GRAS, R., MONNIER, G., 1972. El perfil cultural ; el estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Madrid, España. Ed. Mundi Prensa.
- HERVÉ, D., 1996. Algunos métodos de investigación en suelos. La Paz, Bolivia, IBTA-ORSTOM, Informe ORSTOM N° 53, pp. 29-44.
- HERVÉ, D., & ORSAG, V., 1996. Las labranzas en perspectiva en los Andes centrales. La Paz, Bolivia, IBTA-ORSTOM, Informe ORSTOM N° 52, 109 p.
- HERVÉ, D., MITA, V., PAZ, B., 2001. Sistemas de labranza para suelos salinos. In: Memorias I Congreso Boliviano de la Ciencia del Suelo, La Paz, pp. 121-136.
- HERVÉ, D. & RAMOS D., 1995. Stabilité structurale de sols de l'altiplano bolivien. Effet de la durée de la jachère. In : IIIème réunion du groupe thématique "Structure et Fertilité des Sols Tropicaux", Montpellier, France, 13 septembre 1995, Orstom, pp. 59-67.
- HILGARD, E. W., 1906. Soils, their formation, properties, composition, and relations to climate and plant growth. New York and London, 593 p., illus.
- HUANG, P.M., 2000. Environmental Soil Chemistry and Human Welfare. Conferencia Plenaria, XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 8-12 de Nov., Pucón , Chile.
- IBTA-SISTEMAS DE PRODUCCION, 1992. Análisis de la información secundaria del Altiplano boliviano. La Paz, Bolivia, Proyecto Sistemas de Producción en el altiplano boliviano, convenio IBTA-CIID/Canadá. IBTA 124/Boletín Técnico 04/SIPAB 02, pp. 7-42.
- ILTIS, A., CARMOUZE, J.P., LEMOALLE, J., 1991. Características físico-químicas del agua. In C. Dejoux, A. Iltis (Eds.): El Lago Titicaca. La Paz, Bolivia, ORSTOM-HISBOL, 107-114.

- INE, 1992. Censo Nacional de Población y Vivienda. La Paz, Bolivia, Resultados Finales Vol. 2.
- INTECOSA-AIC-CNR., 1993. Plan director binacional TDPS-CE y republicas de Perú y Bolivia (Proyecto de riego y necesidades de agua en el sistema TDPS). Estudios de hidroquímica, contaminación y climatología.
- JACOBSEN, S.-E., H. QUISPE, J.L. CHRISTIANSEN & A. MUJICA., 2000. What are the mechanisms responsible for salt tolerance in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)? Proceedings of COST 814 Conference, Crop Development for Cool and Wet Regions of Europe, 10-13 May, Pordenone, Italy, p. 43
- JACOBY, B., 1994. Mechanisms Involved in Salt Tolerance in Plants. In: Handbook of Plant and Crop Stress (Pessarakli, M. Ed.). Marcel Decker, Inc. New York, pp. 97-119.
- JACKSON, M.L., 1982. Analisis químico de suelos. Barcelona, España, Ediciones Omega S. A., pp. 311-367.
- JIMENEZ, A., COUDRAIN-RIBSTEIN, A., 1995. Determinación de aguas salinas en acuíferos mediante exploración geoelectrica en el altiplano central. In P. Ribstein, B. Francou (Eds): Actas del Seminario Internacional Aguas Glaciares y cambios climáticos en los Andes Tropicales, La Paz, Bolivia, ORSTOM-UMSA-SENAMHI-CONAPHI, pp. 253-254.
- KABATA-PENDRAS, A. & PENDRAS., H., 1994. Trace Elements in Soil and Plants. CRC. Press, Boca Ratón, Florida, USA, 315 p.
- KLOQUE, A., 1980. Mitteilungen des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs und Forschungsanstalten. VDLUFA, feft 1-3.

- KATERJI, N., VAN HOORN, J.W., HAMDY, A., KARAM, F. & MASTRORILLI, M., 1994. Effect of salinity on emergence and on water stress and early seedling growth of sunflower and maize. In: *Agricultural water management*, Elsevier Science, 81 - 91.
- KOVDA, V. A., 1995. Evolution of salinity, alkanity and waterlogging. Roma, Italia, *FAO Soils Bulletin* **31**: 7-8.
- KOVDA, V.A. & COOLS, 1967. International source-book on irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity. FAO-UNESCO, 663 p.
- LABORATORIO DE SALINIDAD DE LOS E.U.A., 1993. Diagnóstico y Rehabilitación de suelos salinos y sódicos. México, Limusa, México DF, 172 p.
- LANGBEIN, W.B., 1961. Salinity and hydrology of closed lakes, a study of the long-term balance between input and loss of salts in closed lakes. *Geological survey*, 412.
- LEDEZMA, R., 1995. Influencia del Riego en los Procesos de Salinización y Sodificación en suelos de la provincia Gualberto Villarroel. Tesis de grado, Ing. Agr., Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 275 p.
- LEDEZMA, R., 2001. Recuperación de suelos salinos y/o sódicos mediante el establecimiento de praderas de kauchi. In: *Memorias I Congreso Boliviano de la Ciencia del Suelo*, La Paz, Bolivia, pp. 121-136.
- LEDEZMA, R., JIMENEZ, A., MOREAU, S., COUDRAIN-RIBSTEIN, A., 1995. Recursos hídricos para riego en la Provincia Villarroel, Altiplano Boliviano. *Bull Inst. Fr. Etudes andines*, **24 (3)**: 473-482.
- LEDEZMA, R. & RUIZ, P., 1995. Opciones de riego en el Altiplano Central Boliviano; río Desaguadero y agua subterránea. In P. Ribstein, B. Francou (Eds) : *Aguas glaciares y*

Cambios climáticos en los Andes Tropicales, ORSTOM-UMSA-SENAMHI-CONAPHI, pp. 251-252.

LEDOUX, E. & LEVASSOR, A., 1993. NEWSAM; Un programme général de simulation des écoulements et des transports de matière dans les systèmes aquifères complexes. Fontainebleau, France, CIG/ENSMP, Notice d'utilisation, 182 p.

LINDSAY, W., 1972. Zn in Soil and Plant Nutrition. *Adv. Agrôn.*, **24**: 147-186.

LINDSAY, W. & NORWILL, 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese and Copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **42**: 421-428.

LOPEZ, R.J. & LOPEZ, M.J., 1978. El diagnóstico de suelos y plantas. Madrid, España, Ed. Mundi-Prensa, 4 ed., pp. 183-219.

LORINI, J., GEYGER, E., LIBERMAN, M., 1984. Ecofisiología de algunas halófitas en un ambiente especial del Altiplano Central de Bolivia. La Paz, *Ecología en Bolivia*, N° 5, La Paz, octubre 1984, 1-28.

MACA (Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios), 1976. Estudio Semidetallado de Suelos y Aptitud para el Riego – Proyecto Ulloma, Departamento de Suelos, La Paz, Bolivia, 105 p.

MAGISTAD, O. C., 1945. Plant growth relations on saline and alkali soils. *Botan. Rev.*, **11**: 181-230.

MAGISTAD, O. C. & REITEMEIER, R.F., 1943. Soil solution concentrations on the wilting point and their correlation with plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **13** : 213-217.

MAGISTAD, O. C. & CHRISTIANSEN, J.E., 1944. Saline soils, their nature and management. US Dep. Agric., N° 787, Washington D.C.

- MASSY, N., VALDIVIA, J., 1995. Mapeo y caracterización de campos nativos de pastoreo del canton San José Llanga. La Paz, Bolivia, MACA/IBTA/USAID/SR-CRPS, IBTA 168/BOLETIN TECNICO 45/ SR-CRSP 34/1995, 38 p.
- MILLER & DONAHUE, 1990. Soils, an introduction to soil and plant growth. Pretince Hall, International Edition.
- MIRANDA, R., 1995. Caracterización físico química de los suelos del canton San José Llanga y su relación con asociaciones vegetales. Tesis de grado, Ing. Agr., Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 129 p. + anexos 58 p.
- MOHAMMAD, R., 1995. Use of satellite imagery for salinity appraisal in the indus plain. Roma, Italia, *FAO Soils Bulletin* 31: 141-146.
- MONEM BALBA, A., 1995. Predecting soil salinization, alkalization and waterlogging. Roma, Italia, *FAO Soils Bulletin* 31: 241-251.
- MOREAU, S., 1989. The Teledetection and Delineation of Saline/Alkaline Soil in Cochabamba department (Bolivia); a comparison of field survey methods with remote sensing using Landsat MSS data. MSc. Thesis, Montreal, Canada.
- MOREAU, S., LEDEZMA, R., 1994. Estudio comparativo de mapeos de salinidad y/o sodicidad. La Paz, ABTEMA.
- MOREAU, S., LEDEZMA, R., BOSSENO, R., 1997. Optimización de la producción agropecuaria mediante el mapeo de suelos salinos/sódicos con Lansat TM, en la zona de Papel Pampa - Puerto Castrillo -Eucaliptus, Bolivia. In M. Liberman y C. Baied (Eds.): Desarrollo Sostenible de Ecosistemas de Montaña, Manejo de Areas Frágiles en los Andes Tropicales, La Paz, UNU - PL 480, pp. 295-299.

- MOUGUIART, P., ARGOLLO, J., CORREGE, T., MARTIN, L., MONTENEGRO, M.E., SIFEDDINE, A. & WIRRMANN, D., 1997. Changements limnologiques et climatologiques dans le bassin du lac Titicaca (Bolivie), depuis 30 000 ans. *C.R. Acad. Sci. Paris (II)* **325**: 139-46.
- MIYAMOTO, S., *et al.*, 1984. Overview of saline water irrigation in far west Texas. In Proceedings of irrigation and drainage speciality conference, ASCE, Flagstaff, Arizona, July 24-26.
- NETER, J., WASSERMAN, W., KUTNER, M., 1990. Applied linear statistical models. Harbac.
- ORSAG, V., 1989. Altiplano agricultura y riego. Periódico HOY, Dic/89, La Paz, Bolivia, 6 p.
- ORSAG, V., 1992. Altiplano: Agricultura, riego y medio ambiente. Cochabamba, Bolivia, Seminario Recursos hídricos y medio ambiente, pp. 3-24.
- ORSAG, V., 1993. Estudio preliminar de la protección del suelo y su influencia sobre la reducción de pérdida de agua por evaporación de un suelo franco arcilloso del Altiplano Central. La Paz, Bolivia, Ing. Agr., Universidad Mayor de San Andrés, *Revista Jiltañani*, N° 1: 29-37.
- ORSAG, V. & BLANCO, M., 2001. Caracterización físico-química de algunos suelos en el bloque andino oriental de Bolivia y mineralogía de sus arcillas. In Memorias I Congreso Boliviano de la Ciencia del Suelo, La Paz, pp. 121-136.
- ORSAG, V., GAITA, A., LEDEZMA, R., 1998. Limitaciones y potencialidades de los sectores de Chilahualla y el Choro (altiplano boliviano) para el riego con aguas del río Desaguadero. La Paz, Bolivia, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, *Revista Jiltañani*, Año 3, N° 3 : 42-56.

- PDM (Plan de Desarrollo Municipal), 1998. Segunda Sección Municipal de Papel Pampa, Provincia Gualberto Villarroel. Municipio de Papel Pampa.
- PEÑA, O., 1994. Evaluación de los recursos hídricos del Cantón San José de Llanga (Provincia Aroma, Departamento de La Paz). Tesis de grado, Ing. Agr., Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 143 p.
- PEÑA O., & COUDRAIN-RIBSTEIN A., 1995. Evaluación de los recursos hídricos del canton San José Llanga, provincia Aroma del departamento de La Paz. IBTA 150/Boletín Técnico 18/SR-CRSP 12/1995. Convenio MACA/IBTA/USAID/SR-CRSP, La Paz, Bolivia, 36 p.
- PNUMA-OEA-Comité Ad-Hoc., 1996. Diagnostico ambiental del sistema Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa (sistema TDPS) Bolivia, Perú, UNEP-Departamento de desarrollo regional y medio ambiente de la OEA-Washington DC., 191 p.
- POLJAKOFF-MAYBER, A., & LERNER, H.R., 1998. Plants in saline environments. In: Handbook of plant and crop stress, second edition (Ed. Pessaraki, M.), Marcel Dekker, Inc., Nueva York. E.U.A., pp. 125-148.
- PORTA, J., LOPEZ-ACEVEDO, M. & ROQUERO, C., 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid, España, Edit. Mundi-Prensa, 807 p.
- PORTUGAL, J. & ALZERRECA, H., 1992. Establecimiento del sub arbusto *Suaeda foliosa*, Moq. (Kauchi) con diferentes sistemas de siembra. In: X Reunión Nacional de ABOPA, DANCHURCHID/ABOPA/IBTA, pp. 101-106.
- POZO, E. & ALZERRECA, H., 1992a. La forrajera *Suaeda foliosa* Moq. "Kauchi": escarificación y germinación de su semilla. In: X Reunión Nacional de ABOPA, DANCHURCHID-ABOPA-IBTA, pp. 81-86.

POZO, E. & ALZERRECA, H., 1992b. Germinación de la *Suaeda foliosa* Moq. en macetas y posterior trasplante a microparcels. In: X Reunión Nacional de ABOPA, DANCHURCHAID/ABOPA/IBTA, pp. 87-92.

PRADO, F., 1999. Fisiología y bioquímica del estrés: respuestas de las plantas al ambiente. In Jacobsen, S.-E. & Mujica, A.(Eds.): Fisiología de la resistencia a sequía en quinua (*Chenopodium quinua* Willd.). 1° Curso internacional, Proyecto Quinua CIP-DANIDA, pp. 21-29.

PRIETO, G. & DE QUEIROZ, J., 1995. Cultivo por trasplante del *Atriplex alimus* en suelos salinos del Altiplano Central de Bolivia. La Paz, Bolivia, IBTA 177/BOLETIN TECNICO 45/ SR-CRSP 43/1995, MACA/IBTA/USAID/SR-CRPS, 14 p.

PROGRAMA DE AUTODESARROLLO CAMPESINO, 1990. Estudio del sistema de riego y drenaje para Rivera Alta, Provincia Gualberto Villarroel. La Paz, Bolivia, Ed. PAC-II-COMUNIDAD EUROPEA-CORDEPAZ, 82 p.

PROGRAMA DE AUTODESARROLLO CAMPESINO PACII, 1996. Limitaciones y potencialidades de los sectores de Chilahuala y el Choro (Altiplano Boliviano) para el riego con aguas del río desaguadero. In: Proyecto río Desaguadero, estudio de factibilidad, La Paz, Bolivia, Ed. PAC-II-COMUNIDAD EUROPEA-CORDEPAZ, 30 p.

QUINTANILLA, J., CALLICONDE, M., GUYOT, J.L., ROCHE, M., NORIEGA, L., CALLE, H., CORTES, J., 1988. Cargas en suspensión, salinidades y transportes de materia sobre el altiplano boliviano. *Revista de Ingeniería Sanitaria*, pp. 54-59.

QUINTANILLA, J., COUDRAIN-RIBSTEIN, A., MARTINEZ, J., 1995. Hidroquímica de las aguas del Altiplano de Bolivia. In P. Ribstein, B. Francou (eds): Actas del Seminario

Internacional Aguas Glaciares y cambios climáticos en los Andes Tropicales, ORSTOM-UMSA-SENAMHI-CONAPHI, pp. 85-96.

QUINTANILLA, J., COUDRAIN-RIBSTEIN, A., MARTINEZ, J., CAMACHO, V., 1995. Hidroquímica de las aguas del Altiplano de Bolivia. *Bull Inst. Fr. Etudes andines* , **24 (3)**: 461-471.

QUINTANILLA, J., GUMIEL, D., GUYOT, J.L., 1991. Evaluación preliminar de la hidrología e hidroquímica del norte del Altiplano Boliviano. La Paz, Bolivia, *Revista Boliviana de Química*, Vol 10, N° 1, pp. 59-64.

QUISBERT, M., 1980. Clasificación y Mapeo de Suelos con Fines de Salinidad Comprendida entre Tomás Barrón, Papel Pampa y Chilahuala. Tesis de grado, Ing. Agr., Universidad Mayor San Simón, Cochabamba, Bolivia, 146 p.

QUISBERT, J., 1997. Recuperación de una pradera de Alfalfa (*Medicago sativa*) mediante subsolado en la provincia Aroma. Tesis de grado, Ing. Agr., Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 131 p + anexos 25 p.

QUISPE, H. & JACOBSEN, S., 1999a. Tolerancia de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) a la salinidad. In S.-E. Jacobsen, A. Valdez (Eds.): Primer Taller Internacional sobre Quinua – Recursos Genéticos y Sistemas de Producción, 10-14 May, UNALM, Lima, Perú, Libro de Resúmenes, p. 131.

QUISPE, H. & JACOBSEN, S.-E., 1999b. Germination of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under saline conditions. In Proceedings of COST 814-Workshop: Alternative Crops for Sustainable Agriculture, 13-15 June 1999, Turku, Finland, pp. 326-330.

RAMOS, D., 1994. Efecto del subsolado en las propiedades físicas del suelo y el sistema radicular de dos cultivos (cebada y quinua), en el Altiplano Central. Tesis de grado, Ing. Agr., Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, 180 p.

- RAMOS, D., 1996. El subsolado como alternativa en el altiplano para mejorar las propiedades hidrofísicas del suelo. In Hervé D., Ramos D., Orsag V. (Eds.): Las labranzas en perspectiva, Informe ORSTOM N° 52, pp. 84-94.
- RAMOS, D. & HERVE, D., 1996. Determinación de la estabilidad estructural de la superficie del suelo. In Hervé D., Ramos D., Orsag V. (Eds.): Las labranzas en perspectiva, Informe ORSTOM N° 53, pp. 29-47.
- RAMS, B.S. & STEINES, E., 1994. Soil and Water Contamination by Heavy Metals. CRC Press. Inc., Boca Ratón, Florida, USA.
- REDDY, M. & IYENGAR, E., 1998. Crop responses to salt stress: Seawater application and prospects. In: Handbook of plant and crop stress, Second edition (Ed. Pessarakli, M.). Marcel Dekker, Inc., Nueva York, E.U.A., pp.1041-68.
- REITEMEIER, R.F., 1946. Effect of moisture content on the dissolved and exchangeable ion of soils of arid regions. *Soil Sci.* **61** : 1195-1214, Illus.
- RHOADES, J. D., 1982. Soluble salts. Methods of Soil Analysis. Pt. 2. Chemical and Microbiological properties. Agronomy; Monograph 9 (Second edition), AAASA - SSSA, Madison, Wisconsin, pp. 159 - 165.
- RHOADES, J. D., 1995. Measuring, mapping and monitoring field salinity and water table depths with soil resistance measurements. Roma, Italia, *FAO Soils Bulletin* **31**: 159-186.
- RICHARDS, L. A. (Ed.), 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA, Agriculture Handbook N°60, 160 p.
- RICHARDS, L. A. (Ed.), 1965. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. México, D.F., Centro Regional de Ayuda Técnica, 4 ed. en español, Trad. por N. Sánchez Durón, 172 p.

- RIDING, D.F., 1994. Water resource development in Provincia Villarroel, Bolivian Altiplano. MSc. Thesis Ground Water Engineering, Department of civil Engineering, University of Newcastle Upon Tyne, 80 p.
- RISACHER, F. & FRITZ, B., 1991. Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. *Chem. Geology*, **90** : 211-231.
- RISACHER, F. & FRITZ, B., 1995. La genèse des lacs salés. *La Recherche* 276, Vol. 26, 516-522.
- ROCABADO, M., 1999. Descripción de los Sistemas de riego Comunal. Provincia Gualberto Villarroel. La Paz, Bolivia, Informe avance Proyecto de Tesis, 22 p.
- ROCABADO, M., 2001. Impacto del riego tradicional con aguas del río Desaguadero en Suelos y vegetación de la comunidad Santa Ana (provincia Gualberto Villarroel) Tesis de grado UMSA, La Paz, Bolivia (en prensa).
- ROCHA, R. & ORSAG, V., 1992. Efecto de la aplicación de riego con aguas salinas entre tres especies de papa amarga y dulce. In J. Rea y J.J. Vacher (Eds.): I Mesa Redonda sobre la papa amarga, La Paz, 7-8/05/91, ORSTOM, pp. 85-91.
- ROGERS, D.B. & DREISS, S.J., 1995. Saline groundwater in Mono Basin, California. 1. Distribution. 2. Long-term control of lake salinity by groundwater. *Water Resour. Res.* **31**: 3131-3150 and 3151-3169.
- ROJAS, A., ORSAG, V., VALLEJOS, C., 1997. Evaluación del impacto de las lagunas de evaporación en Inti Raymi sobre la degradación de los suelos circundantes. Trabajo de consultoría MINCO SRL, La Paz, Bolivia.
- ROYO, A. & ARAGUES, R. 1995. Efecto de la Salinidad sobre diversos caracteres morfo-fisiológicos y sobre el rendimiento en grano de la cebada. In: Investigación Agraria,

- Producción y Protección Vegetal, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentación, Madrid, España, pp. 71-84.
- SAS Institute Inc. 1996. SAS/STAT User's Guide, Release 6.03 Edition. Cary, NC: SAS Institute, 1028 p.
- SALM, H., 1984. Algunas consideraciones, sobre el uso de agua subterránea en una comunidad típica del Altiplano Central de Bolivia. *Ecología en Bolivia*, N° 5, La Paz, Octubre de 1984, 29-37.
- SALM, H., 1993. Estudio preliminar de suelos del altiplano central boliviano. *Ecología en Bolivia*, N° 4, La Paz, 43-47.
- SALM, H. & GEHLER, E., 1987. La salinización del suelo en el Altiplano Central de Bolivia y su influencia sobre la cobertura vegetal. *Ecología en Bolivia*, N° 10, La Paz, julio 1987, 37-48.
- SALM, H. & GEHLER, E., 1989. Suelos salinos en el Altiplano Central de Bolivia y su relación con el crecimiento de las plantas. *Revista Boliviana de Química*, **8 (1)**: 3-10.
- SCHOFIELD, R.K., 1955. The measurement of soil pH. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19** : 164-167.
- SELTZER, G.O., RODBELL, D.T. & ABBOT, M. 1995. Andean glacial lakes and climate variability since the last glacial maximum. *Bull. Inst. fr. études andines*, **24 (3)**: 539-549.
- SERVANT, M., FOURNIER, M., ARGOLLO J., SERVANT-VILDARY, S., SYLVESTRE F., WIRRMANN, D. & YBERT J.P., 1995. La dernière transition glaciaire/interglaciaire des Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des variations des niveaux lacustres et des fluctuations glaciaires. *C.R. Acad. Sci. Paris* **320**, Iia: 729-36.
- SHIMPER, A.F.W., 1903. Plant geography upon a physiological basis. Clarendon, Oxford, UK.

- SHMUELI, M. & GOLDBERG, D., 1974. Emergencia, crecimiento temprano y salinidad de cinco hortalizas germinadas con riego por goteo y por aspersión en una zona árida. Centro Regional de Ayuda Técnica, Agencia para el Desarrollo Internacional, México, 6 p. Traducción de : emergence, early growth, and salinity of five vegetable crops germinated by sprinkle and trickle irrigation in an arid zone, *Hort. Science*, **6 (6)**, 1971.
- SIGMOND, A.A.J. de, 1927. The clasification of alkaly and salty soils. First Internatl. Cong. Soil Sci. Proc. 1 : 330-344, Illus.
- SIGMOND A.A.J. de, 1938. The principles of soil science, London, 362 p., Illus.
- SIMON, M. & GARCIA, I., 1999. Physico-chemical properties of the soil-saturación extracts: estimación from electrical conductivity. *Geoderma* **90**: 99-109.
- SONNEVELD, C. & KREIJ C., 1999. Response of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) to an unequal distribución of salts in the root environment. *Plant and Soil*, **209**: 47-56.
- SOIL SURVEY STAFF, 1951. Soil survey manual. Washington, U.S.D.A., Soil Conservation Service, Agriculture Handbook N°18, 503 p., Illus.
- SOIL SURVEY STAFF, 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Washington, U.S.D.A., Soil Conservation Service.
- SPOSITO, G., 1977. The Gapon and Vasenlow selectivity coefficients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41**: 1205-1206.
- SPOSITO, G. *et al.*, 1981. Trace Metal Complexation by Fulvic Acid extracted from Sewage sludgy. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **45** : 465-468.

- SPOSITO, G. & MATTIGOD S.W., 1999. On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **3**: 233-329.
- SRIVASTAVA, J.P. & KUMAR, A., 1995. Current Perspectives in Water Loss from plants and Stomatal action. In.: Handbook of plant and crop physiology (Ed. Pessaraki, M.). Marcel Dekker, Inc. New York, U.E.A., pp. 45-59.
- SUBBARAO, G.V., 1998. Strategies and scope for improving salinity tolerance in crop plants. In: Handbook of plant and crop stress, Second edition (Ed. Pessaraki, M.), Marcel Dekker, Inc., Nueva York, E.U.A., pp. 1069-1087.
- SUBCOMISION MIXTA PERUANO-BOLIVIANO PARA EL DESARROLLO DE LA ZONA DE INTEGRACIÓN DEL LAGO TITICACA, 1990. Términos de referencia para la formulación de un plan director global binacional de protección, prevención de inundaciones y aprovechamiento de los recursos del Lago Titicaca, 18 p.
- SYLVESTRE, F., SERVANT, M., SERVANT-VILDARY, S., CAUSSE, C., FOURNIER, M. & YBERT, J.P., 1999. Lake level chronology on the Southern Bolivian Altiplano (18°-23°S) during the Late-Glacial Time and the Early Holocene. *Quaternary Res.*, **51**: 54-66.
- SZABOLCS, I., DARAB, K., 1995. Soil and hidrology surveys for the prognosis and monitoring of salinity and alkalinity. Roma, Italia, *FAO Soils Bulletin* **31**: 119-129.
- SZABOLCS, I., 1995. Present and potential salt affected soils. Roma, Italia, *FAO Soils Bulletin*, **31**: 9 - 13.
- TALBI, A., COUDRAIN, A., RIBSTEIN, P. & POUYAUD, B., 1999. Computation of the rainfall of the lake Titicaca catchment during the Holocene. *C.R. Acad. Sc. Paris*, **329**: 197-203, bilingual note.

- TEJADA, E., GUZMAN R., 1993. Halófitas arbustivas forrajeras; un recurso potencial para la agroforestería Andina. Programa de Repoblamiento Forestal, CORDECO - IC - COTESU, Cochabamba, Bolivia, 133 p.
- TORREZ, J., CRESPO, W., AMURRIO, J., 1996. Delimitación de áreas salinas, salino-sódicas y sódicas mediante teledetección, sistemas de información geográfica y datos de campo del valle alto de Cochabamba. *Revista de Agricultura*, Año 52, N° 28, 2-8.
- VACHER, J.J., IMAÑA, E., CANQUI, E., 1994. Las características radiativas y la evapotranspiración potencial en el altiplano boliviano. UMSS, *Revista de Agricultura* **24**: 4-11.
- VAN OLPHEN, H., 1977. An introduction to clay colloid chemistry. New York, John Wiley & Sons, 318 p.
- VOLKMAR, K. & WOODBURY, W., 1995. Plant – Water Relationships. In.: Handbook of plant and crop physiology (Ed. Pessarakli, M.). Marcel Dekker, Inc. New York, U.E.A., pp. 23 - 43.
- WASHINGTON, A. *et al.*, 1993. Analysis of Seasonal Landscape Dynamics on the Bolivian Altiplano. Utah State University.
- WILCOX, L.V., 1960. Boron injury to plants. USDA Inf. Bol. 211, 7 p.
- YAGODIN, B.A., 1982. Agroquímica, Tomo 2, Edit Mir, Moscu, Rusia.
- YOUNGER, P.L., 1992. Quaternary geocology and hydrogeology; the value of an interdisciplinary approach. *Geoscientist*, **2** (5) : 24-27.
- YOUNGER, P.L., 1993. Simple generalised methods for estimating aquifer storage paramaters. *Quaterly Journal of Engineering Geology*, **26** : 127-135.

YOUNGER, P. L., 1994. Low-cost Groundwater quality investigation methods an example from the Bolivian Altiplano. In H. Nash and G.J.H. McCall (eds) : Grounwater Quality, Chapman & Hall., pp. 55-65.

YUNTA, 1992. Diagnóstico de la Provincia Gualberto Villarroel (Zona Baja). YUNTA-PROCADE, La Paz, Bolivia, 193 p.

YUNTA, 1994. Prospección geoelectrica en la provincia Gualberto Villarroel, zonas intermedias y bajas. La Paz, Centro de promoción y cooperación campesina, 42 p. + anexos 69 p.

YUNTA, 1995. "Proyecto de riego Mollebamba". Provincia Gualberto Villarroel. La Paz, Bolivia, 130 p.

YUNTA, 1995. Proyecto: "Recuperación de suelos salino/sódicos mediante el establecimiento de praderas de kauchi para su incorporación en los sistemas de pastoreo de la zona baja de la provincia Gualberto Villarroel", enero de 1995, 48 p.

YUNTA, 1996. Informe Avance de Proyecto: "Recuperación de suelos Salino / sódicos mediante el establecimiento de praderas de kauchi para su incorporación en los sistemas de pastoreo de la zona baja de la provincia Gualberto Villarroel", 78 p.

YUNTA, 1996. Informe de Avance de proyecto: "Desarrollo Integrado basado en la producción Ganadera". Inseminación Artificial, Primer Semestre 1996, La Paz, Bolivia, 95 p.

YUNTA, 1997. Informe Avance de Proyecto: "Recuperación de suelos Salino / sódicos mediante el establecimiento de praderas de kauchi para su incorporación en los sistemas de pastoreo de la zona baja de la provincia Gualberto Villarroel", 85 p.

YUNTA, 1998a. Informe de Avance de proyecto: "Desarrollo Integrado basado en la producción Ganadera". Inseminación Artificial, Primer Semestre 1998, La Paz, Bolivia, 110 p.

YUNTA, 1998b. Informe de Avance de proyecto: “Desarrollo Integrado basado en la producción Ganadera”. Inseminación Artificial, Segundo Semestre 1998, La Paz, Bolivia, 170 p.

YUNTA, 1998c. Informe Avance de Proyecto: “Recuperación de suelos Salino / sódicos mediante el establecimiento de praderas de kauchi para su incorporación en los sistemas de pastoreo de la zona baja de la provincia Gualberto Villarroel”, 102 p.

YUNTA, 1999. Informe Final de Proyecto: “Recuperación de suelos Salino / sódicos mediante el establecimiento de praderas de kauchi para su incorporación en los sistemas de pastoreo de la zona baja de la provincia Gualberto Villarroel”, 12 p.

YUNTA-PROCADE, 1994. Plan de Desarrollo Micro-regional de la provincia Gualberto Villarroel, La Paz, Bolivia.

ZONISIG, 1998. Republica de Bolivia: Zonificación Agroecológica y Socioeconómica de la Cuenca del Altiplano del Departamento de La Paz. La Paz, Bolivia, DHV Consultores-ITC, 213 p.

ZONNEVELD, I. S., 1995. Survey methods for performance, monitoring and prognosis of natural vegetation and economic crops with special reference to salt affected soils. Roma, Italia, *FAO Soils Bulletin*, **31**: 195-211.

9. ANEXOS

9.1. Grupos Mayores de Suelos y Unidades de Suelo, relacionados con los suelos salinos/alcalinos o yesosos (Clasificación de suelos FAO-UNESCO) (M. Flores, V. Orsag)

LEPTOSOLES (LP): Suelos que están limitados en profundidad por una roca dura continua o por materiales muy calcáreos (carbonato de calcio equivalente de más del 40%) o por una capa cementada continua dentro de una profundidad de 30 cm a partir de la superficie o con menos del 20% de tierra fina hasta una profundidad de 75 cm. Pueden presentar horizontes-diagnóstico.

Leptosoles líticos (LPq): Leptosoles limitados en profundidad por roca dura continua o por una capa cementada continua dentro de una profundidad de 10 cm a partir de la superficie.

Leptosoles rendsicos (LPk): Leptosoles con horizonte A móllico que contiene o está situado inmediatamente encima de material calcáreo con un contenido equivalente en carbonato de calcio mayor al 40%.

Leptosoles éutricos (LPe): Otros Leptosoles (pueden o no tener características salinas y/o sódicas).

VERTISOLES (VR): Suelos con 30% o más de arcilla (de naturaleza esmectítica) en todos los horizontes hasta por lo menos 50 cm, de profundidad. Con grietas anchas y profundas y slikensides que se cortan.

Vertisoles gypsicos (VRy): Vertisoles con horizonte gypstico dentro de una profundidad de 125 cm a partir de la superficie.

Vertisoles cálcicos (VRk): Vertisoles con horizonte cálcico o concentraciones de caliza pulverulenta blanda dentro de una profundidad de 125 cm a partir de la superficie.

Vertisoles éutricos (VRe): Otros vertisoles (pueden o no tener características salinas y/o sódicas).

FLUVISOLES (FL): Suelos aluviales con propiedades flúvicas que no tienen otros horizontes diagnóstico más que un A ócrico, mólico o úmbrico o un horizonte H hístico o un horizonte sulfúrico o material sulfuroso en una profundidad de 125 cm a partir de la superficie.

Fluvisoles sálicos (FLs): Fluvisoles con propiedades sálicas.

Fluvisoles calcáricos (FLc): Fluvisoles calcáreos al menos entre 20 y 50 cm de profundidad, bien drenados.

Fluvisoles éutricos (Fle): Otros Fluvisoles (pueden o no tener características salinas y/o sódicas).

SOLONCHAKS (SC): suelos con propiedades sálicas, que no tienen otros horizontes diagnóstico más que un horizonte A ócrico, mólico ó úmbrico, un horizonte hístico, B cámbico, un horizonte cálcico o gypico, un horizonte nátrico o lúvico.

Solonchaks gléicos (SCg): Solonchaks con propiedades gléicas dentro de una profundidad de 100 cm.

Solonchaks mólicos (SCm): Solonchaks con horizonte cálcico dentro de una profundidad de 125 cm.

Solonchaks gypicos (SCy): Solonchaks con horizonte gypico dentro de una profundidad de 125 cm.

Solonchaks sódicos (SCn): Solonchaks con propiedades sódicas, por lo menos entre 20 y 50 cm de profundidad.

Solonchaks háplicos: otros Solonchaks.

GLEYSOLES (GL), suelos con propiedades gleicas dentro de una profundidad de 50 cm sin otro horizonte diagnóstico más que un A, un horizonte H hístico, un horizonte B cámbico, un horizonte sulfúrico, cálcico o gypico careciendo de plintita en una profundidad de 125 cm.

Gleysoles cálcicos (GLk): Gleysoles con un horizonte cálcico dentro de una profundidad de 125 cm.

Gleysoles éutricos (Gle): Otros Gleysoles (pueden o no tener características salinas y/o sódicas).

ARENOSOLES (AR): suelos de textura más gruesa que franco arenosa, hasta una profundidad de 125 cm, muy permeables. Menos de 35 % de fragmentos de roca u otros fragmentos s gruesos dentro de una profundidad 100 cm. No tienen otros horizontes diagnóstico más que un A ócrico o un horizonte E álbico.

Arenosoles calcáridos (ARc): Arenosoles que son calcáreos por lo menos entre 20 y 50 cm de profundidad.

REGOSOLES (RG): Suelos formados a partir de materiales no consolidados, que no tienen otros horizontes diagnóstico que un A ócrico o úmbrico.

Regosoles calcáricos (RGc): Regosoles que son calcáreos al menos entre 20 y 50 cm de profundidad.

Regosoles éutricos (Rge): Otros Regosoles (pueden o no tener características salinas y/o sódicas).

SOLONETZ (SN): suelos con horizonte B nátrico.

Solonetz gléicos (SNG): Solonetz con propiedades gléicas dentro de una profundidad de 100 cm.

Solonetz stágnicos (SNj): Solonetz con propiedades stágnicas dentro de una profundidad de 50 cm.

Solonetz móllicos (SNm): Solonetz con horizonte A móllico.

Solonetz gypsico (SNy): Solonetz con horizonte gypsico dentro de una profundidad de 125 cm.

Solonetz cálcico (SNk): Solonetz con horizonte cálcico dentro de una profundidad de 125 cm.

Solonetz háptico (SNh): Otros solonetz

CHERNOZEMS (CH): Suelos que tienen horizonte A móllico con una intensidad de color en húmedo de 2 o menos hasta una profundidad de por lo menos 15 cm; con un horizonte cálcico o petrocálcico o concentraciones de caliza pulverulenta blanda, dentro de una profundidad de 125 cm o con ambas características.

Chernozems gleicos (CHg): Chernozems con horizonte B árgico y con propiedades gléicas dentro de una profundidad de 100 cm.

Chernozems lúvicos (CHI): Chernozems con horizonte B árgico pudiendo presentar un horizonte cálcico debajo del horizonte B.

Chernozems glósicos (CHw): Chernozems que muestran lenguas del horizonte A dentro del B cámbico o dentro del horizonte C.

Chernozems cálcicos (CHk): Chernozems con horizonte cálcico o petrocálcico.

Chernozems hápticos (CHh): Otros Chernozems.

KASTANOZEMS (KS): Suelos que tienen horizonte A móllico con una intensidad de color en húmedo de 2 o menos hasta una profundidad de por lo menos 15 cm; con una o más de las siguientes características: un horizonte cálcico o petrocálcico o gypsico o concentraciones de caliza pulverulenta blanda dentro de una profundidad de 125 cm.

Kastanozems gypsicos (KSy): Kastanozems con horizonte gypsico

Kastanozems lúvicos (KSl): Kastanozems con horizonte B árgico, pudiendo presentar un horizonte cálcico por debajo del horizonte B.

Kastanozems cálcico (KSk): Kastanozems con horizonte cálcico o petrocálcico.

Kastanozems háplicos (KSh): Otros Kastanozems.

PHAEOZEMS (PH): Suelos con horizonte A móllico y un grado de saturación de bases de 50% o más (por NH₄Oac) dentro de una profundidad de 125 cm.

Phaeozems calcáricos (PHc): Phaeozems que son calcáreos por lo menos entre 20 y 50 cm de profundidad.

GYPSISOLES (GY): Suelos con horizonte gypsico o petrogypsico dentro de una profundidad de 125 cm sin otros horizontes diagnóstico más que un A óchrico, B cámbico, B árgico, impregnado de yeso o carbonato de calcio, un horizonte cálcico o petrocálcico.

Gypsisoles pétricos (GYp): Gypsisoles con horizonte petrocálcico, cuya parte superior se presenta dentro de una profundidad de 100 cm a partir de la superficie.

Gypsisoles cálcicos (GYk): Gypsisoles con horizonte cálcico.

Gypsisoles lúvicos (GYl): Gypsisoles con horizonte B árgico.

Gypsisoles háplicos (GYh): Otros Gypsisoles.

CALCISOLES (CL): Suelos con horizonte cálcico o petrocálcico o con una concentración de caliza pulverulenta blanda dentro de una profundidad de 125 cm; sin otros horizontes diagnóstico más que un A ócrico, un B cámbico o un horizonte B árgico que es calcáreo.

Calcisoles pétricos (CLp): Calcisoles con horizonte petrocálcico cuya parte superior se presenta dentro de una profundidad de 100 cm.

Calcisoles lúvicos (CLl): Calcisoles con B árgico

Calcisoles háplicos (CLh): Otros calcisoles.

LUVISOLES (LV): Suelos con horizonte B árgico que tiene una capacidad de cambio superior o igual a 24 cmol (+) kg⁻¹ de arcilla, en todas partes, y un grado de saturación (por NH₄OAc) del 50% como mínimo, en la totalidad del horizonte B, hasta una profundidad de 125 cm.

Luvisoles cálcicos (LVk): Luvisoles con horizonte cálcico o concentraciones de caliza pulverulenta blanda, dentro de una profundidad de 125 cm.

Luvisoles háplicos: Otros Luvisoles.

CAMBISOLES, suelos con horizonte cámbico, debajo de un ochrico, úmbrico o móllico.

Cambisoles calcáricos (CMc): Cambisoles calcáreos por lo menos entre 20 y 50 cm de profundidad.

Cambisoles éutricos (Cme): Otros Cambisoles (pueden o no tener características salinas y/o sódicas).

9.2. Guía para diferenciar subunidades en la clasificación de subunidades en la clasificación FAO - UNESCO (M. Flores)

Teniendo en cuenta que la Leyenda del Mapa Mundial de Suelos ha sido y esta siendo usada para cartografiar a escalas mayores que 1:5.000.000, es necesario separar y definir subunidades de suelos en un tercer nivel (FAO-Unesco, 1997). Todavía no es posible hacer una relación general de una tercera categoría de subunidades de suelos a una escala global. Estas subunidades tienen que ser definidas de acuerdo con las necesidades específicas a nivel nacional o regional.

Los ejemplos de suelos salinos y/o sódicos que se dan a continuación son un intento de guiar la diferenciación de las subunidades de tercer nivel. Se reconoce que será necesario un posterior seguimiento y dirección para conservar la uniformidad con la nomenclatura de la FAO-Unesco. Las diferentes subunidades que se refieren a suelos salinos y/o sódicos se resumen a continuación.

- a) Subunidades que indican intergrados entre los grupos principales de suelos al primer nivel, por ejemplo: Phaeozems verti-calcáricos (PHcv): Phaeozems calcáricos que presentan propiedades vérticas en una profundidad de 50 cm a partir de la superficie.
- b) Subunidades que indican intergrados entre unidades de suelos al segundo nivel, por ejemplo: Solonetz calci-móllicos (SNmk) = Solonetz móllicos con un horizonte cálcico dentro de una profundidad de 125 cm a partir de la superficie.
- c) Subunidades que introducen horizontes o propiedades que a nivel de las unidades de suelos (segundo nivel) sólo se usan como una fase, por ejemplo: Calcisoles duri-háplicos (CLhd) = Calcisoles háplicos con un duripan a menos de 125 cm de profundidad a partir de la superficie.
- d) Subunidades que indican características adicionales a las usadas en las definiciones de las unidades de primer y segundo nivel, por ejemplo: Solonchaks eutri-háplicos (Sche) = Solonchaks háplicos que tienen un grado de saturación (por NH₄Oac) del 50% como mínimo, por lo menos entre 20 y 50cm de profundidad a partir de la superficie.

- e) Subunidades que suministran especificaciones más precisas de características que usan en la definición de las unidades de suelos de segundo nivel, por ejemplo: Cambisoles hipercalcáricos (CMch) = Cambisoles calcáricos en los que el material calcáreo tiene más del 40% de CaCO₃ equivalente.

Una observación general para la separación de las subunidades de suelos es que deberían ser definidas con mucha claridad, y que sus definiciones no deberían solapar ni entrar en conflicto con las definiciones de las unidades de suelos del primer y segundo nivel.

9.3. Interacciones entre sales y análisis físico del suelo

9.3.1. Granulometría (M. Pansu)

El análisis granulométrico puede ser erróneo debido a la presencia de sales solubles, sesquioxidos, carbonatos y yeso (gypsum). Este componente puede actuar de dos maneras contradictorias (Vieillefon, 1979): floculación debido a los iones calcio solubles (disminución relativa de la tasa de arcilla), densidad de yeso baja (aumento de la tasa de arcilla). El análisis granulométrico empieza generalmente por un pretratamiento de la muestra que puede variar según el tipo de suelo y su contenido en yeso. Se debe entonces empezar por determinar el contenido aproximado en yeso.

Secar en estufa ventilada a 60°C durante 24h (para eliminar el agua de hidratación) una muestra de 10g de suelo tamizado a 2mm. Refrescar en desecador y pesar P1. Volver a secar esta muestra a 105°C durante un mínimo de 3 horas para eliminar el agua de constitución, refrescar en desecador y pesar P2. El tenor en yeso (expresado en %) es $= 100 \frac{P1-P2}{10} \times \frac{172}{36} = 50 (P1-P2)$.

En suelos ricos en sales sódicas, sin yeso, cuya conductividad 1/5 es superior a 0,3 mS cm⁻¹, a 5 mL de extracto acuoso, añadir 5 mL de acetona y constatar una ausencia de precipitado. En este caso, se elimina las sales por lavado y decantación-filtración. Si el yeso es inferior o igual a 10%, el test de acetona es positivo, con una precipitación; en este caso, se elimina el yeso por lavado con agitación. El yeso es soluble en agua a razón de 2 gL⁻¹ a 25°C. Después de la destrucción de la materia orgánica y del calcáreo, poner los 10g en agitación con agitador magnético en un becher de 500mL con 300 mL de agua destilada. Después de una hora, dejar depositar y aparecer la parte clara, que se retomara con 300mL de agua

destilada y repetir la operación hasta que el test con acetona sea negativo (ningún precipitado con 5mL de extracto acuoso con 5mL de acetona.

Si el yeso es superior a 10%, se elimina el yeso por calentamiento a 60°C y luego hasta 105°C. Los resultados son en este caso difíciles de interpretar y se tiene que adaptar técnicas particulares (Vieillefon, 1979). La disolución completa del yeso lleva a expresar la composición elemental de la parte sin yeso del suelo y no del suelo total. Los métodos experimentales deben ser asociados a la resina intercambiadora de iones.

9.3.2. Implicaciones del tipo de arcilla sobre sales intercambiables (J. Gautheyrou)

El análisis por rayos X de muestras de Villaroel provenientes de Laruta y San Miguel (Hervé *et al.*, 2001) indica una composición compleja en arcillas: Illita a composición insegura (K, Ca, Na), inter-estratificada irregularmente con esméctica-illita, ratio de cristalinización de 1:1, 2:1, 2:1:1. Los umbrales de detección DRX son de 5-10% para trazas. En el caso de illitas derivadas de muscovita K (Si₃Al) Al₂ O₁₀ (OH)₂, dioctaédricas, se les puede considerar como en transición hacia arcillas 2:1 expandibles (Montmorillonita-vermiculita). Su alteración se traduce por la pérdida de K, eventualmente un reemplazo parcial por cationes K, Na, Ca y una reducción de las cargas interfoliarias que bloquean K en una forma inicialmente no intercambiable.

La realización de análisis de rutina fiables es difícil en un medio tan heterogéneo.

Se debe evitar la acción de ácidos minerales u orgánicos concentrados y controlar el pH de extracción u operar en medio tamponado. La presencia de materiales 2:1 expandibles exige un tiempo de rehidratación para alcanzar equilibrios sólidos-soluciones. El problema con los illitas es que los efectos de borde y los planes de ruptura permiten liberar K normalmente no intercambiable. Cuando se forma illita por alteración, cuando la concentración en K es inferior a un valor crítico, K es reemplazado por otros cationes de la solución (Na, Ca). Habría que evitar los contactos demasiado largos. La dispersión en medio pyrophosphato permite en general de mantener la suspensión y de integrar la granulometría de las partículas de Ca al análisis. Pero el pyro y el hexa metaphosphate siendo portadores del ion PO₄³⁻ son inadaptados si existe una fuerte capacidad de intercambio aniónico (allophano, imoyolite...).

El análisis granulométrico sería considerablemente simplificado si se dispusiera de un Zeta metro para medir los parámetros de dispersión. Para los análisis de sales solubles e intercambiables, la filtración es importante. El líquido sobre el cual se trabaja debe ser claro.

Para la eliminación de sales solubles excedentes, las limpiezas con etanol o metanol son criticables por que la solubilidad de las sales es muy diferente en agua y en alcohol, también la presencia de acidez volátil en el etanol desplaza significativamente los iones en posición de intercambio. Se prefiere reactivos diluidos, sacados de su acidez volátil y modos operativos rigurosos.

La CIC en los illitas indica muy a menudo una retrogradación de K^+ y NH_4^+ , el déficit de carga esta compensado y permite restablecer una atracción electrostática interfoliar fuerte. En las illitas, incluso las degradadas, K domina siempre fuertemente; la carga interfoliar se queda siempre más elevada en relación a las esmectitas expansibles. La CIC de la muscovita es nula al nivel del interfoliar, pero baja para las cargas externas (10-15 méq/100 g.). Si se observa 40-50 méq, es que son presentes inter estratificados, cuyos iones son retenidos menos fuertemente. Con la disminución del tamaño de las partículas de illita, la CIC crece ligeramente, pero se debe a los intercambios de capas externas de superficie importante y de planos de ruptura mas abundantes. Para la CIC, hay que evitar los reactivos como el tetraphenyl borate $NaB(C_6H_5)_4 + EDTA$, que ataca el K^+ del interfoliar y libera el K^+ de reserva. En este caso no hay intercambio pero disolución del AP dioctaedrique.

9.4. Comentarios sobre el método de análisis de los cationes intercambiables y de la capacidad de intercambio catiónico aplicado en el IBTEN por R. Ledezma, V. Orsag, J. Chungara

Por: Jacques Gautheyrou

MÉTODO 1. Este método esta destinado al análisis de los cationes intercambiables en suelos salinos a complejo saturado por Na^+ . El lavado con ethanol diluido es peligroso si uno no está seguro que el etanol es suficientemente puro; puede contener una fracción importante de acidez volátil. Se tiene que controlar esta acidez que puede introducir una variable aleatoria más o menos importante, vinculada también al pH de los suelos.

Un control de Ca, Mg, K en los extractos alcohólicos permite verificar eventualmente las pérdidas con un balance completo de sales solubles y de cationes intercambiables, detectando por ejemplo materias orgánicas solubilizadas.

La selección de Na⁺ en medio de “tampón” a pH 7.0 permite de desplazar Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, sin modificar demasiado las cargas globales del complejo inicial. Normalmente el Acetato de Na está tamponado a pH 8.1-8.2. Na⁺ está casi totalmente dissociado en solución; no presenta adsorción selectiva, pero su fuerza iónica es de una de las más bajas de la serie liotrópica admitida: Ca⁺⁺>Mg⁺⁺>K⁺, NH₄⁺>Na⁺>Li⁺.

La dosificación en el extracto de acetato Na puede crear problemas por la concentración en Na⁺ (dilución necesaria, depósito sobre el orificio de inyección etc.)

MÉTODO 2. Este método de determinación del Na⁺ intercambiable está también adaptado a los suelos salados. En el lavado preliminar de sales solubles con solución etanol diluido, se debe tomar los mismos cuidados que los expresados arriba.

Para el desplazamiento de los cationes intercambiables residuales por el acetato de NH₄ a pH, 7.0, se puede comparar por una parte las extracciones por Na de Ca-Mg-K y por otra parte NH₄⁺, con además Na⁺ intercambiable. Este método olvida dosificar Na⁺ en el extracto.

Existe una diferencia significativa entre los dos métodos? El NH₄⁺ de los suelos analizados es absorbido selectivamente? (presencia de smectita, illita, cargas variables en suelos provenientes de cenizas volcánicas). Recién con esta información, se puede decir si la combinación de los tres métodos es necesaria y proponer un método combinado CEC – Cationes intercambiables, con condiciones de test estadístico según la naturaleza de los suelos y de las arcillas, la naturaleza de las cargas y su distribución, los iones presentes, la selectividad...

MÉTODO 3 (CIC-acetato de NH₄⁺), con saturación prealable al acetato de Na⁺ a pH 7.0, luego lavado del excedente de Na⁺ y eventualmente de sales solubles presentes, y finalmente desplazamiento de Na⁺ por acetato de NH₄⁺ a pH “tampón” a 7.0.

La medida del Na⁺ desplazado da la CIC (Na⁺) a pH 7.0. Cuál sería la CIC con saturación por NH₄⁺ en primer lugar y luego medida por desplazamiento con un contra-ion Na⁺ (o K⁺)? (amplitud de las variaciones según los tipos de suelos, límites de la explotación estadística).

9.5. Suma de cationes y capacidad de intercambio catiónico (D. Hervé, M. Pansu)

Cuadro 8.1. Comparación de tres métodos de determinación de la suma de cationes y capacidad de intercambio catiónico

Complejo de Intercambio Catiónico					
Muestras	(meq/100 g)	SML 5	LART 31	LART 38	LART 39
Método Acetato de NH₄ 1N a pH 7 (CIRAD, Montpellier, Francia)					
Ca		16,59	16,55	37,87	24,05
Mg		5,70	9,71	8,87	7,40
K		1,41	1,72	1,92	1,34
Na		26,80	23,00	23,80	19,00
Na (AcONH ₄)- Na(soluble)		3,62	3,96	4,87	1,46
CIC		21,88	23,49	23,16	17,07
Suma de cationes		50,50	50,98	72,46	51,79
S/T %		230,79	217,01	312,85	303,42
Método Cobaltihexamine, Co(NH₃)₆ Cl₃ (CIRAD, Montpellier)					
Ca		15,49	9,61	13,48	12,60
Mg		4,45	8,51	7,94	6,28
K		1,36	1,48	1,43	1,27
Na		23,55	20,87	20,07	17,54
Al		0,00	0,00	0,00	0,00
Mn		0,00	0,00	0,00	0,00
H		0,00	0,00	0,00	0,00
PH extracto Co		7,79	7,86	7,55	7,96
CIC		22,90	23,57	25,39	18,37
Suma de cationes		44,85	40,47	42,92	37,69
S/T%		195,85	171,70	169,04	205,17
Método Cloruro de baryum BaCl₂ 1M con triéthanolamine pH 8,1 (LFS, ORSTOM, Bondy, France)					
Ca		8,78	8,24	11,9	12
Mg		5,69	8,39	8,16	6,42
K		1,64	1,85	1,95	1,45
Na		8,72	6,16	8,04	2,44
CIC		15,39	18,70	22,87	26,50
Suma de cationes		24,83	24,64	30,05	22,31
S/T %		161,3	131,8	131,4	84,2

La suma de cationes supera frecuentemente, en suelos salinos, la capacidad de intercambio catiónico. Queremos ilustrar este resultado con la comparación de tres métodos de determinación aplicados a algunas muestras de G. Villarroel (Cuadro 8.1).

Después de aplicar la solución de acetato de amonio, 1N a pH 7, el exceso de amonio está eliminado por lavados sucesivos con alcohol etílico absoluto (control de ausencia de NH_4 por el reactivo de Nessler). Luego, se desplaza el amonio fijado por una solución NaCl 1N y dosificación de NH_4 por colorimetría en auto analizador para conseguir la CIC. Los resultados de calcio son superiores con el método del acetato por que este método disuelve los carbonatos; el sodio soluble es similar en los dos primeros métodos y muy por debajo en el tercer caso; el magnesio y el potasio son muy similares. La relación S/T es en casi todos los casos netamente superior a 100%, sobre todo con los dos primeros métodos. Esta situación se debe probablemente a la falta de detección y dosificación de un catión o a formas de cationes diferentes. No existe un método que resuelva sistemáticamente este tipo de problema.

9.6. Extracto de saturación (V. Orsag)

Como las sales ejercen su efecto de acuerdo a la concentración que tienen en la solución del suelo y no guardan ninguna relación con las sales presentes en la tierra expresadas como porcentaje (López R. Y López M. 1985), el porcentaje de sales es un método inadecuado para valorar la salinidad. En este sentido, el método más conveniente para medir la salinidad sería obtener una muestra de la solución del suelo, dentro de los límites de humedad que se dan en el campo.

Sin embargo, este procedimiento es muy laborioso y el laboratorio de EUA propuso el uso del extractor de saturación en el cual el suelo se satura con agua y se deja equilibrar para luego extraer el agua mediante succión. La ventaja especial del método radica en que el porcentaje de saturación o agua necesaria para saturar el suelo, se relaciona con los valores extremos de agua útil del suelo: capacidad de campo (CC) e índice de marchitez (cantidad de agua por debajo de la cual la planta se marchita y muere). Así el porcentaje es aproximadamente igual al doble de la capacidad de campo (CC) y casi cuatro veces el índice de marchitez. Esto quiere decir que la

concentración de la solución de un suelo cultivable será de dos a cuatro veces el contenido al efectuar un extracto de saturación.

Reitemeier et al. (1946) han demostrado que los valores, que se obtienen en las determinaciones del contenido de aniones y cationes solubles de los suelos salinos y alcalinos, están notablemente influenciados por el contenido de humedad al cual se hace la extracción. Las cantidades totales disueltas de algunos iones aumentan al aumentar el contenido de humedad, en tanto que disminuyen las de otros. Casi invariablemente, los valores del contenido total de sales aumentan al aumentar el contenido total de humedad en el momento de la extracción. Al aumentar el contenido de humedad, se presentan ciertos procesos responsables de los cambios en las cantidades totales y relativas de los iones solubles, tales como las reacciones de intercambio catiónico, la adsorción negativa de los iones, la hidrólisis y la mayor solución de los silicatos minerales, carbonatos de metales alcalino-térreos y del yeso. Lo ideal sería hacer la determinación de los iones solubles en extractos obtenidos a un contenido de humedad que quede dentro de los límites de la capacidad de campo, pero desafortunadamente, la preparación de esos extractos es muy engorrosa y requiere un equipo especial de extracción.

El por ciento de saturación representa el nivel más bajo del contenido de humedad para obtener extractos en el trabajo de rutina. Por lo tanto, se recomienda el uso del extracto de saturación para la determinación de iones solubles. Por regla general, se puede obtener mediante filtración casi la cuarta parte de la humedad en una pasta saturada de suelo. El contenido de la humedad correspondiente a la saturación del suelo es la cantidad máxima de agua que puede retener el suelo sin que, al practicar una depresión en la masa del mismo, se acumule agua libre. La cantidad de muestra de suelo a extraer para realizar esta determinación depende de la textura del mismo y del volumen de la celda de conductividades que deba emplearse.

10. REFERENCIAS DE LOS AUTORES

Bosque H. (UMSA)

Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andres (UMSA), casilla 12807, La Paz, Bolivia. E-mail: hbosque@hotmail.com

Coudrain-Ribstein Anne (CNRS-IRD)

1) Maison des Sciences de l'Eau (MSE), 300 Avenue Pr. Emile Jeanbrau
34800, Montpellier

Tel.: (0033) 467149090, Fax : (0033) 467144999, coudrain@msem.univ-montp2.fr

2) UMR 7619 Sisyphe (Talbi A., Ledoux E., Ribstein P., de Marsily G.)

Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, case 123, Tour 26, 5^e étage, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Chungara Jorge (IBTEN)

IBTEN, Avenida 6 de Agosto 2905, Casilla 4821, La Paz, Bolivia.

Fax: 005912 433063, Tel. Viacha: 800095, Tel. personal: 232393

Flores Marcos (Brazil)

Gautheyrou Jacques (IRD)

6 avenue Meniville, 94100 Saint Maur des Fossés, France.

Tel. personal: 0142835607

Hervé Dominique (IRD)

1) IRD, LER, BP 5045, 34032 Montpellier

Tel.: (33-1) 467636981, Fax: 467638778, herve@mpl.ird.fr

2) IRD-CIP/CONDESAN, Apt 1558, Lima 12, Perú. Fax (00511)3175326.

Misión IRD, Casilla 181209, Lima 18, Perú. Fax: (00511) 2222174.

Jacobsen Stev (CIP)

CIP, Apt 1558, Lima 12, Perú.

Fax : (00511) 3175326, Tel.: 3496017, s.jacobsen@cgiar.org

Ledezma Ruben, David Ramos (YUNTA)

YUNTA, Plaza Villaroel 100, Miraflores, La Paz.

Fax: (005912) 215022, Tel.: 212865, 215022

Tel. personal: 219464, yunta@ceibo.entelnet.bo, rlds@ceibo.entelnet.bo

Miranda Roberto (ALT)

ALT, Calle Campos 348, La Paz. Tel. personal: 452924

Mita Victor (IRD-IE)

IRD, Hernando Siles N°5290 con calle 7 de Obrajes, Casilla 9214, La Paz, Bolivia.

Fax :782944, Tel.: 782969, 784925, bpazbe@ceibo.megalink.com, victormita@hotmail.com

Orsag Vladimir (SBCS)

ALT-SBCS-UMSA, Calle Campos 348, La Paz.

Tel. personal: 799980, orsag_molina@megalink.com

Pansu Marc (IRD)

IRD, 911 avenue Agropolis, BP5045, 34032 Montpellier.

Tel.: 00334 67416100. pansu@mpl.ird.fr



La presente edición se terminó de imprimir
en junio de 2002
en los talleres Gráficos "Perez" - Tel. 2255911

Depósito Legal: 4-1-971-02
La Paz - Bolivia