

## **AVANCES EN EL CONOCIMIENTO Y EL USO DE LOS SUELOS SALINOS Y/O SODICOS EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO**

Hervé D.<sup>1</sup>, Ledezma R.<sup>2</sup>, Orsag V.<sup>3</sup>

1 IRD-CIP/Condesan, actualmente IRD, LER, BP5045, 34032 Montpellier, Francia.

[herve@mp.lird.fr](mailto:herve@mp.lird.fr)

2 Yunta, Av. Bush y Estados Unidos n° 100, La Paz, Bolivia.

[Yunta@ceibo.entelnet.bo](mailto:Yunta@ceibo.entelnet.bo); [rlds@ceibo.entelnet.bo](mailto:rlds@ceibo.entelnet.bo)

3 ALT, Calle campos 348, La Paz, Bolivia.

[orsag\\_molina@megalink.com](mailto:orsag_molina@megalink.com)

Nota: Este texto es el resumen de la introducción y la conclusión del libro "Limitantes y manejo de los suelos salinos y/o sodicos en el altiplano boliviano", actualmente en proceso de revisión, y que será coeditado con el Instituto Frances de Estudios Andinos (IFEA).

### **I- JUSTIFICACION**

La problemática de los suelos salinos en Bolivia no se limita a la cuenca del río Desaguadero en el altiplano boliviano; es mucho mas extensa y abarca 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 es una preocupación para una población importante que subsiste mediante el uso de la tierra.

Los problemas de salinidad y/o sodicidad de los suelos en el territorio boliviano deben ser analizados ampliamente a partir de una cuantificación de los recursos afectados, tierra y agua, y tomando en cuenta las limitaciones económicas para implementar acciones de recuperación de suelos. Se tiene que buscar soluciones prácticas y económicas, al alcance de los pobladores, comunidades, municipios y provincias en estas zonas afectadas.

De manera general, los problemas de salinidad son mas extensos en los climas semiáridos a áridos, donde la evapotranspiración supera a la pluviometría. La disponibilidad de recursos hídricos siendo limitada, se deben analizar cuidadosamente todas las posibilidades que están al alcance. Una de las posibilidades ciertas en el altiplano boliviano es el aprovechamiento de las aguas del río Desaguadero, que se origina en el lago Titicaca y constituye por ello una alternativa importante a pesar de tener limitaciones de uso. La construcción por la Autoridad del Lago Titicaca (ALT), entidad binacional Perú-Bolivia, de una represa en el río Desaguadero, a la desembocadura del lago Titicaca, despierta muchas preguntas sobre el futuro lecho y caudal del Desaguadero y sobre 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.

Hasta el momento, se ha cuestionado bastante el aprovechamiento del agua, sin tomar en cuenta las experiencias desarrolladas por los propios habitantes del lugar. Ellos viven de la ganadería y riegan desde muchos años especies forrajeras, con agua salada y en suelos salinos. El ALT estimó a 9000 km<sup>2</sup> el área con riesgos de salinidad en la cuenca del Desaguadero. La cuestión básica es entonces de 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 del 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).

En las afirmaciones que se escuchan frecuentemente, aparece un cuestionamiento del uso de aguas salinas para el riego de suelos salinos. Se señalan la escasez del recurso agua en la zona, en cantidad y calidad, los problemas de contaminación, la inapropiada aplicación de riego por parte de los usuarios, la falta de cultivos alternativos que justifiquen una inversión económica. Estas preguntas tocan varios aspectos: suelos, cantidad y calidad de las aguas superficiales y subterráneas, factibilidad del riego, usos múltiples (consumo humano, riego, minas). Es claro que estas preguntas no encontrarían respuestas sin una amplia colaboración entre disciplinas complementarias: hidrología, geología, edafología y agronomía. Las respuestas no incuben solamente a científicos sino también a especialistas del desarrollo, de las ONGs principalmente, que pueden documentar experiencias exitosas de rehabilitación llevadas a cabo en el altiplano. Algunas preguntas encontrarán respuesta y 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 de buscar referencias fuera de Bolivia, en otros países tropicales donde se presentan los mismos problemas.

El reto de este libro de síntesis consiste entonces en recolectar los conocimientos disponibles, 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, sequía seguida de inundaciones. 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 desconocida del Estado que siempre ha desatendido las provincias concernidas.

Limitamos el ámbito de validación de estas respuestas a la cuenca del río Desaguadero, en su parte situada en las provincias de Villarroel y Aroma del departamento de La Paz, y con posibilidades de extrapolación a las provincias Tomás Barrón, Cercado y Saucarí del departamento de Oruro (**Mapa 1**). 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), que ganó fondos a concurso holandeses gestionados por Condesan (Consortium para el Desarrollo Sostenible de la Ecoregion Andina). El Consortium 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.

En este libro, se recuerda los conocimientos esenciales sobre el altiplano central boliviano en cuanto a suelo, agua superficial y subterránea y vegetación, y se revisa los métodos de determinación de la salinidad. Se analiza 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 termina por una reflexión sobre las crónicas interrelacionadas de las acciones de investigación y de desarrollo en la provincia G. Villarroel, para comprobar la sostenibilidad de las propuestas ya implementadas.

## II- CONCLUSIONES PARCIALES

En primer lugar, se logró replantear las afirmaciones iniciales.

### *Afirmación 1:*

*Si llueve menos de 400 mm por año, solo 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 quedara muy reducido. Se tiene entonces que diseñar alternativas para el cultivo de secano y para cosechar aguas de lluvia escurridas, compatibles con suelos salinos. Halófitas como el kauchi (*Suaeda foliosa*), pero también arbustivas forrajeras, podrían ser probadas en secano, en base a la experiencia de otros países (Australia, Africa del Sur, Israel, USA, etc..).

### *Afirmación 2:*

*Las aguas del Desaguadero son demasiado salinas para poder usarlas para riego.*

A la diferencia de la salinidad del lago Titicaca, que queda bastante estable aun la variabilidad de los aportes, el grado de salinidad del agua del río Desaguadero depende de donde se capta el agua y de la época del año. La salinidad aumenta a medida que la toma se aleje del lago Titicaca. La salinidad en la época seca es más alta que en la época de lluvia, porque la dilución en el agua es menor. Aparece 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. Se debería en todo caso 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 han mostrado contenidos en Na de 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 sigue usando 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. Pero no se conoce suficientemente la velocidad de estos procesos. También el aumento de la conductividad eléctrica (CE) podrá afectar la productividad relativa de las parcelas. Para la alfalfa, a cada aumento de  $1 \text{ dS.m}^{-1}$  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 actual 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, que 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 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 en 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 esta es demasiado reciente.*

El riego se inició en la provincia G. Villaroel en 1963, para regar cultivos introducidos, pero algunos canales existían 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 no está siempre documentado su estado de 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 país de Chile. Sería muy útil poder comparar los sistemas de riego en cuanto a su eficiencia y a las reglas de gestión social del agua. En el altiplano el riego es principalmente destinado a la producción forrajera. 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.

*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 los suelos en la zona radicular, 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 sí debe ser controlada y orientada para un manejo adecuado (Ledezma, 1995). Se mantendría en el futuro solo un riego complementario para la instalación del cultivo. Para la alfalfa, se procede a riegos más continuos. 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 otra 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 muchas 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.

#### *Afirmación 7:*

*El agua del Desaguadero esta contaminada con metales pesados, su uso es peligroso para el consumo humano.*

El tema de la contaminación del agua de bebida 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) arsenico, y (3) boro pueden alcanzar niveles calificados de tóxicos, y necesitan por esta razón un monitoreo 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 en interpretar, en el estado actual del conocimiento en Bolivia. Falta también precisar las normas de toxicidad para el consumo humano.

### **III- PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES**

#### **3.1- Efectos del riego sobre la salinización y la sodificación de los suelos**

##### **Integración Clima - Suelo - Planta**

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 en conjunto:

##### - Clima:

Precipitación, cantidad y modelo de distribución,  
Evapotranspiración,  
Velocidad de viento.

##### - Calidad química del agua:

Conductividad eléctrica y pH,  
Contenido de cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ : SAR),  
Contenido de aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ),  
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 debido a la calidad del agua, frente de humedad que pueden alcanzar los horizontes salinos, etc., es necesario indicar que con aguas de mala calidad el éxito o el fracaso dependerá 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 los 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 los sales.

Frente a tal lista de conocimientos necesarios, convendría reflexionar sobre qué conjunto de datos mínimos, correctamente articulados, se debería necesitar para realizar un diagnóstico sobre las posibilidades de riego con aguas saladas, en las condiciones del altiplano boliviano. El desafío es claramente metodológico.

### **Métodos de evaluación del impacto del riego**

Es difícil aislar, en un suelo irrigado desde varios años, el *efecto cumulativo 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 a diferentes profundidades. Los resultados de las comparaciones no aparecen muy nitidos 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 el mismo número de años, sin riego, pero de preferencia con el mismo cultivo y en el mismo tipo de suelo. Aparece sumamente importante describir con mejor detalle el suelo de la parcela testigo y sus antecedentes de cultivo. Un autor da una precisión sobre su localización: a no más de 200 metros. Será suficiente para asegurar la homogeneidad del suelo? En todo caso, se comparan pares de parcelas: 0-5 años, 0-10 años, y como máximo 20 a 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 secano. Habría razonablemente que alejarse suficientemente de un canal de riego para encontrar parcelas sin riego. Resulta también difícil imaginar una parcela de alfalfa no riegada sin que haya una napa freática bastante cercana. En este caso, las situaciones que se comparan deberían en todo rigor tener no solamente el mismo tipo de suelo pero, también, la misma profundidad y calidad de napa freática.

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 desembocar en un diagnóstico. Las diferencias entre profundidades se pueden deber solamente a la época del estudio, por lo que se debe 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 para ello de métodos de determinación y de claves de interpretación totalmente seguros. El análisis de suelos salinos y/o sodicos presenta una serie de dificultades. Se ha avanzado en el tema de los pre-tratamientos; hay que ser concientes 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 para otros tipos de suelos, no se jerarquiza e integra suficientemente los diferentes criterios de determinación de la calidad del agua. Cuales son los riesgos respectivos provenientes de las sales, el boro, el cloro, los metales pesados, la carga de sedimentos? Temas como los metales pesados empiezan recién a ser tratados. Aparece imprescindible monitorear la calidad del agua: seguimiento de pozos ubicados en una base de datos georeferenciada, muestras en el río Desaguadero, muestras en 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.

### **Métodos de riego**

Algunos métodos de riego pueden aumentar el desarrollo de las plantas en suelos salinos, gracias a que mantienen diluidas las concentraciones de sales presentes. La aplicación de láminas de riego elevadas en el riego por inundación puede alcanzar fácilmente los horizontes salinos y/o sódicos que se encuentran generalmente en los horizontes inferiores de los suelos del altiplano y producir de esta manera un lavado parcial de la zona donde se encuentran las raíces. Estas láminas de riego favorecen la dilución de sales pero también su acumulación posterior en la superficie del suelo, durante la época seca del año. Una dilución de estas sales superficiales es luego imprescindible para garantizar la germinación de los cultivos siguientes. Por otro lado láminas demasiado elevadas de riego pueden hacer ascender la napa freática y con esto acelerar los procesos de salinización.

Los diferentes métodos de riego, usados por los comunarios de la provincia G.Villaruel, no se adecuan de la misma forma a estos propósitos:

- Riego por inundación no controlada,
- Riego por inundación con surcos guía,
- Riego por inundación en tablonés,
- Riego por surcos en camellones.

Orsag y Miranda (2000) han podido evidenciar que tanto en Santa Ana (Chilahuala) como en Japo (El Choro), donde se están utilizando para el riego aguas con alto contenido de sales, partículas en suspensión y metales pesados, existe cierta tendencia a la acumulación de sales y al incremento del Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) por efecto del riego. 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. En ciertas condiciones, el riego por goteo con aguas salinas se puede aplicar donde están fallando los métodos tradicionales de riego (Goldberg & Shmueli, 1973). En ese sentido es importante continuar evaluando la influencia de los diferentes métodos de riego sobre la salinización y alcalinización de los suelos en condiciones locales.

### **3.2- Manejo de Coberturas Vegetales, Suelos y Aguas**

Las limitaciones que presenta la llanura fluvio lacustre del río del Desaguadero a nivel edafoclimático y socioeconómico, no garantizan bajo condiciones de secano 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; solo se consigue en un año con muchas precipitaciones. En estas condiciones, no es posible impulsar el desarrollo agropecuario sostenible de la zona con base a criterios tradicionales. Se propone entonces de impulsar, en esta zona del Altiplano boliviano, 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).

#### **Manejo de plantas tolerantes**

Investigaciones llevadas a cabo en Israel (desierto del Negev) muestran que es posible producir tomates para conservas con aguas subterráneas, donde la conductividad está comprendida entre 4 y 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 oleaginosas, pastos, árboles, arbustos forrajeros, arbustos energéticos, y una variedad de fibras y productos para farmacias y otros, 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  $4 \text{ dS.m}^{-1}$ .

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*), cañahua, 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 animales. Faltan referencias en la zona de la tolerancia a las sales de los otros cultivos de las rotaciones como papa, cebada, haba, cañahua, para poder diseñar *sucesiones de cultivo* adaptadas a niveles crecientes de salinidad en el suelo. El problema es entonces de encadenar varios cultivos o, tal vez, cultivos y halofitas, 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 monitorear los umbrales de concentración de sales y sodio, encima de los cuales resulta peligroso introducir ciertas especies y, a la vez, contar en el futuro con material genético tolerante a mayores concentraciones de sales y sodio en el Altiplano.

### **Manejo de Suelos**

Al margen de la tolerancia de algunas especies a la salinidad se debe considerar dentro de una agricultura salina como manejar 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 creemos que es importante evaluar algunas variantes bajo las condiciones socioeconómicas del Altiplano. La fuente de calcio necesaria para reemplazar el sodio intercambiable podría provenir del yeso, contenido en forma natural en los suelos de la zona; puede liberar calcio en proporciones aproximadas a 600 ppm y reemplazar al sodio intercambiable del suelo.

Por otro lado habría que determinar el papel de los cationes bivalentes (calcio y magnesio) contenidos en el agua de riego (Desaguadero) sobre la disminución de los procesos de salinización/alcalinización al mantener las propiedades físicas del suelo de manera favorable. Estas situaciones favorecerían, no solo la recuperación o mantenimiento de estructuración de los suelos, sino la disminución del pH y mejoramiento de la permeabilidad y la aereación de los suelos, sin necesidad de tener que recurrir a la aplicación de enmiendas externas.

#### *- Trabajo del suelo*

En ese sentido la siembra en camellones es importante, donde la distribución de sales no es uniforme luego de las lluvias o de un riego. 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.

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 aun mejorar este sistema combinandolo con subsolado, para mejorar el drenado localizado, a la vertical de la zanja creada con discos.

También, la siembra en bancales, practicada en EUA para cultivar en suelos salinos, permite la acumulación de sales en zonas determinadas de los bancales, lugares que son obviados para la siembra del cultivo.

Considerando la tolerancia de la remolacha forrajera a las sales y clima, y su potencial para la ganadería, sería interesante investigar su adaptación a las zonas lecheras del Altiplano, ya que fue probada con éxito en Viacha (Ibten, 1987). Este cultivo, actualmente en los EUA se siembra normalmente en suelos salinos mediante un camellón de 13 a 15 cm, que protege las semillas sembradas de un secado rápido y permite que las sales se acumulen en los lugares más altos de los mencionados camellones y por ende lejos de las semillas durante el proceso de germinación; posteriormente, antes de que las plantas formen tallos largos (situación no deseada en la remolacha), se quitan los camellones.

El subsolado puede ser un método adicional al cultivo con zanja para mejorar el drenaje interno. En suelos arcillosos, se ha demostrado que es posible usar un solo brazo de subsolado si la potencia del tractor no supera 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 la fecha de siembra, 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). Pero no se ha probado la incorporación del estiércol en el mismo surco de la subsoladora, que permitiría más longevidad a los surcos de dren, especialmente en los suelos arcillosos y limo-arcillosos. Se ha incorporado a una subsoladora un artefacto permitiendo de hechar guano en el mismo surco pero no ha sido probada todavía.

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 reemplazados por tubos de PVC. En un suelo franco-arcilloso, se consiguió un buen lavado de sodio, reduciendo la conductividad eléctrica equivalente C<sub>Ee</sub>, de 21.4 ds m<sup>-1</sup> a 3.27 ds m<sup>-1</sup>, 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 en campo real de técnicas de drenaje.

#### **IV- Programa de investigación orientado al manejo sostenible de los recursos suelo, agua y vegetación en la llanura fluvio-lacustre del río Desaguadero**

Considerando la magnitud del problema de salinización/alcalinización en el Altiplano Central de Bolivia, y ante la necesidad de desarrollar y consolidar una Agricultura Salina a corto, mediano y largo plazo, para el uso racional de los recursos suelo, agua y vegetación, es necesario primero 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 satelitales 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 ampliar algunos aspectos insuficientemente considerados hasta ahora como: contenido de yeso en los diferentes horizontes, Concentración Crítica de Coagulación, etc. Otra preocupación es el uso de un sistema adecuado de clasificación de suelos salinos.
- Implementación y evaluación de diferentes combinaciones de prácticas de manejo de suelos (siembra en camellones, surcos, etc.) y de métodos de riego con aguas con problemas de salinidad o alcalinidad, para determinar su incidencia en la disminución de los riesgos de salinidad y sodicidad.
- Evaluación del comportamiento de los límites de capacidad máxima de retención de metales por los suelos de la llanura y búsqueda de límites permisibles de referencia para todos los metales en cultivos del Altiplano.
- *Seguimiento y monitoreo a 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 y se tenga agua diluida. Las variaciones del caudal del Desaguadero son mal conocidas desde el exutorio del lago Titicaca hasta los lagos Uyuni y Poopo, en comparación con lo que se sabe sobre el lago Titicaca.
- Completar la evaluación de las cantidades y calidades de las aguas subterráneas: profundidad, volumen, caudal, frecuencia de bombeo; con la finalidad de definir reglas de uso. Conviene consolidar la metodología empleada, definiendo el conjunto mínimo de análisis necesarios a tomar en cuenta para caracterizar la calidad del agua.
- *Seguimiento y monitoreo del avance de la salinidad /alcalinidad en los suelos de la llanura*, después de consolidar las metodologías de estudios diacrónicos.
- *Monitoreo del impacto de la represa*  
No está cuantificado el % de la superficie total cultivable que se podría regar adicionalmente, luego de la construcción de la represa al exutorio 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 llega, en la época de estiaje, con la construcción de la represa.

- *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. Falta también interpretar la problemática socio-cultural y territorial del riego en esta zona.
- *Realizar un estudio socioeconómico* de la zona de interés a nivel más detallado, para determinar las posibilidades reales de implementar ciertas prácticas. Asimismo es necesario tener un estudio de mercado en las ciudades y poblaciones aledañas para los productos tradicionales y los productos lácteos y derivados de la ganadería debido al crecimiento de la lechería en la zona (caso El Choro, Chilahualla y Aroma).
- Recopilación, revisión y análisis de trabajos, experiencias y resultados *con especies tolerantes a suelos salinos y alcalinos* en Bolivia (Cauchi, Atriplex, etc.) y por otro lado a tecnologías para el manejo sostenible de suelos y agua con problemas de salinidad/alcalinidad, en el mundo. Se fomentara la recolección de material vegetativo y semillas de plantas tolerantes a la salinidad (nativas e introducidas) en el Altiplano boliviano de zonas con diferentes grados de salinidad y alcalinidad y tipos de suelo. 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, inundaciones periódicas. Se procederá a la evaluación participativa del comportamiento de las especies introducidas (en particular alfalfa, remolacha forrajera) y nativas en ensayos multilocales, en diferentes sitios de la llanura fluvio-lacustre (provincias G. Villarroel y Aroma del departamento de La Paz y T. Barrón, Cercado y Saucarí del departamento de Oruro), según tipos de suelo, niveles de salinidad/sodicidad, inundaciones periódicas, sequías y heladas. Se hará un análisis bromatológico de las especies estudiadas y se evaluará las potencialidades de las especies promisorias para su uso como forrajes, alimentos, energía, etc., en el Altiplano boliviano: evaluaciones de germinación, multiplicación y técnicas de siembra; evaluaciones económicas de costos de producción y manejo.
- El trabajo de extensión incluye pruebas de especies promisorias y prácticas de manejo de suelo y agua en fincas de agricultores (parcelas demostrativas) con difusión y capacitación de los comunarios.

## **V- Consideraciones institucionales**

Por otra parte, debido a los problemas de contaminación de aguas que se dan en la cuenca por la actividad minera que afectan a suelos, cultivos y praderas, es necesario contar con mecanismos y herramientas, empezando con una Ley de Aguas aprobada.

Para lograr un manejo sostenible en la llanura no se puede obviar la problemática de la parte alta de la cuenca de donde principalmente provienen algunos contaminantes y sedimentos. En ese sentido es necesario buscar algunas soluciones a estos problemas en forma integral en razón de que ambas son parte de la cuenca del lago Titicaca. Conviene recordarse que mucha agua se usa para riego en el lado peruano de la cuenca, cuando se frena aparentemente el uso de agua salada del lado boliviano.

Si bien a nivel internacional se han desarrollado una serie de experiencias y tecnologías que permitan recuperar y habilitar las tierras afectadas por contenidos de sales o sodio para la producción agropecuaria, estas 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 ve entonces la necesidad de unas consultorias internacionales, pero a la vez, una concertación muy amplia sobre el uso del agua del Desaguadero, y su calidad, por 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, que son un componente importante de 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.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVES, E., 1979. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. México, Colegio de post-grado de Chapingo, 382 p.
- BRESLER, E., Mc NEAL, B., CARTER, D., 1982. Saline and sodic soils. Springer-Verlag, 236p
- 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.
- 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.
- 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.
- PORTA, J., LOPEZ-ACEVEDO, M. & ROQUERO, C., 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid, España, Edit. Mundi-Prensa, 807 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.
- 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.

## **INDICE**

### **Presentación: CONDESAN - IFEA - IRD**

1. INTRODUCCIÓN (Hervé, Ledezma, Orsag)
  
2. CARACTERÍSTICAS DEL ALTIPLANO CENTRAL BOLIVIANO (Ledezma, Flores)
  - 2.1. Ubicación
  - 2.2. Clima
  - 2.3. Geomorfología y geología
  - 2.4. Vegetación
  - 2.5. Población y actividades productivas
  
3. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA SALINIDAD
  - 3.1. Recursos hídricos superficiales (Ledezma & Hervé)
    - 3.1.1. Río Desaguadero
    - 3.1.2. Regulación del sistema TDPS
  
  - 3.2. Recursos hídricos subterráneos y salinidad
    - 3.2.1. Cambios climaticos y reciclaje en algunos milliares de años del cloruro entre lagos y agua subterranea, ejemplo del Altiplano boliviano (Coudrain, Talbi, Ledoux, Ribstein, de Marsily)
    - 3.2.2. Localización, caracterización y extracción de los acuíferos en Villaruel (Coudrain & Ledezma)
    - 3.2.3. Relación entre hidrogeología y salinidad de los suelos en la provincia Aroma (Flores, Hervé, Mita)
  
  - 3.3. Calidad del agua (Orsag)
    - 3.3.1. Criterios para evaluar la calidad del agua para riego
    - 3.3.2. Aguas superficiales
      - 3.3.2.1. Concentración de metales pesados en las aguas del río Desaguadero y de canales de riego
      - 3.3.2.2. Contenido en sales del rio Desaguadero y de los canales de riego
      - 3.3.2.3. Calidad de agua con fines de riego
    - 3.3.3. Aguas subterráneas
      - 3.3.3.1. Provincia Gualberto Villaruel
      - 3.3.3.2. Aguas superficiales y subterráneas en San Jose de Llanga (Aroma)
  
4. SUELOS SALINOS Y/O SÓDICOS

- 4.1. Principios del origen, formación y clasificación de 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 (Orsag, Ledezma, Flores)
    - 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 de suelos salinos y/o sódicos (Chungara)
    - 4.3.1. Definición de los suelos salinos y variables de análisis
    - 4.3.2. Fundamentos y métodos de análisis
    - 4.3.3. Claves de verificación de los resultados del análisis químico y recomendaciones
  - 4.4. Efecto de sales, sodio y boro sobre las propiedades del suelo (Orsag)
    - 4.4.1. Características generales de los sales y boro presentes en suelos salinos
    - 4.4.2. Efectos de los sales y del sodio en el suelo
  - 4.5. Efectos osmóticos de los sales sobre la disponibilidad de agua para las plantas (Jacobsen, Bosque, Orsag)
5. MANEJO DE SUELOS SALINOS
- 5.1. Manejo de las interacciones agua-suelo-vegetación (Hervé & Ledezma)
  - 5.2. Efectos del subsolado sobre suelos salinos y cultivos (resultados experimentales 1994-1996) (Hervé, Ramos, Mita)
    - 5.2.1. Campaña 1994-95
    - 5.2.2. Campaña 1995-96
    - 5.2.3. Conclusiones de las dos campañas (1994-96)
  - 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)
  - 5.4. Manejo del agua de riego
    - 5.4.1. Técnicas de riego y fuentes de agua (Ledezma)
      - Técnicas de riego
      - Riego con agua del Desaguadero
      - Uso de agua de pozos
    - 5.4.2. Impactos del riego
      - 5.4.2.1. Consecuencias pedoquímicas de la irrigación con agua del Desaguadero: Chockonimaya, 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 en los procesos de salinización y sodificación, Provincia G. Villarroel (Ledezma)

## 6. QUINCE AÑOS DE RELACIONES EXITOSAS ENTRE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN (Ledezma & Hervé)

- 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)

- 7.1. Replanteamiento de las afirmaciones iniciales
- 7.2. Efectos del riego sobre la salinización y la sodificación de los suelos
- 7.3. Manejo de coberturas vegetales, suelos y aguas
- 7.4. Proposiciones de investigación orientadas al manejo sostenible de los recursos suelo, agua y vegetación
- 7.5. Manejo institucional

## 8. ANEXOS

- 8.1. Grupos mayores de suelos y unidades de suelos, relacionados con los suelos salinos/alcalinos o yesosos (Clasificación de suelos FAO-UNESCO) (Orsag & Flores)
- 8.2. Guía para diferenciar subunidades en la clasificación FAO-UNESCO (Flores)
- 8.3. Interacciones entre sales y análisis físico de suelo (Pansu, Gautheyrou)
- 8.4. Comentarios sobre el método de análisis de los cationes intercambiables y de la capacidad de intercambio catiónico (Gautheyrou)
- 8.5. Suma de cationes y capacidad de intercambio catiónico (Pansu)
- 8.6. Extracto de saturación (Orsag)

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

## 10. REFERENCIAS DE LOS AUTORES