

# ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS Y VEGETACIÓN POR EFECTO DE RIEGO DEL DESAGUADERO EN LA ZONA DEL CHORO (Prov. Cercado, Dpto. Oruro)

---

Ing. Richard Challgua Nina<sup>1</sup>

## INTRODUCCIÓN

El territorio de Bolivia cuenta con ingentes recursos naturales entre renovables y no renovables destacándose de por medio el elemento agua. Esta diversidad natural abarca extensiones inmensas de territorio tanto en el Oriente como en el Altiplano boliviano. No obstante el hombre a lo largo de toda su vida ha venido explotando las riquezas en su afán de satisfacer sus propias necesidades de sobrevivencia, dedicándose a la explotación irracional de los recursos indicados; dejando a estas áreas en proceso de desertificación caracterizado por la presencia de altos niveles de erosión hídrica y eólica, por la pérdida y degradación de la cobertura vegetal, por los problemas de salinización, del sobre pastoreo de praderas naturales e implantadas, la contaminación por desechos urbanos y los asentamientos humanos en tierras productivas.

Por otra parte el Altiplano boliviano constantemente se agudiza por la problemática del déficit hídrico, lo que obliga a los habitantes a hacer uso del agua de los lagos y ríos existentes (Lago Titicaca, Lago Poopó, Río Desaguadero, etc.), para el riego suplementario y para el suministro a los animales a través de sistemas tradicionales. Sin embargo el riego implementado aumenta también los peligros de degradación y desertificación debido a la mala calidad de las aguas, que contienen soluciones salinas, concentraciones de cloruros y de carbonatos, y de porcentajes mayores en sedimentos; al respecto Holdridge (1985) argumenta que éstas agua al margen de contener soluciones ya mencionadas se detecta la presencia de algunos metales pesados, hecho que limita su uso en todo sentido. La utilización de aguas de esa calidad en zonas no aptas y con problemas de degradación y desertización afecta más en el proceso productivo de los suelos, al verse incrementado el grado de sodicidad y salinidad, permitiendo de esta manera una elevada tasa de erosión, como sucede en gran parte del sector. A esto se le suma otro de los aspectos que desfavorece la sostenibilidad del recurso suelo como las técnicas inadecuadas de riego.

Es el caso típico del Altiplano Central, comprendido los Departamento de La Paz y Oruro, donde el río Desaguadero (con calidad poca apta), llega a constituirse en el único fuente de abastecimiento de agua.

En el sector de “El Choro” provincia Cercado del Departamento de Oruro, existe una organización central de riego tradicional para el uso de las aguas del río Desaguadero que data desde hace 50 años y permite regar actualmente una superficie de 6000 has. aproximadamente, sin embargo hasta el presente no se sabe qué esta pasando con los suelos del sector con tantos años de riego. De acuerdo a las experiencias vivida por los mismos pobladores advierten algunos síntomas y/o

---

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias (UTO), Municipio de El Choro; Email:challgua@coteor.net.bo

transformaciones que sufren los recursos edáficos al observar algunos cambios físico - químicos en la estructura del suelo superficial con una baja cobertura vegetal.

Frente a esta adversidad no se cuenta con ninguna información científica, tampoco existe una política de enfoque al problema que permita encarar esta situación de polución natural tan desfavorable para la agricultura productiva y ganadería de la zona, sobre todo en el sector denominado “El Choro”, permitiendo progresivamente una degradación y su posterior desertificación de los suelos por los factores cancerígenos. Por lo que la preservación, el control, la sustentación y el estudio del medio ambiente y de los recursos naturales aparece como una premisa tan necesaria y urgente que permita lograr mejores condiciones al desarrollo del rubro agrícola ganadera de la región. El presente trabajo persigue responder el siguiente objetivo planteado **“Evaluar el impacto de acumulación de metales pesados en suelos y vegetales en la zona de Japo (El Choro)”** producto de la incidencia del riego con aguas del río Desaguadero, y establecer bases que promuevan alternativas y estrategias para un uso adecuado y sostenible de los recursos agua, suelo y planta.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Situación del área de estudio

Los suelos y vegetales en estudio pertenecen a cuatro zonas comprendidas en la tercera seccional de El Choro, ubicada en la provincia Cercado del departamento de Oruro, a una altitud de 3690 msnm. (Fig. 1). De acuerdo a las zonas de vida propuesta por Holdrige (1975), el área de interés se encuentra ubicada en la zona, Estepa Espinosa Montano Bajo Subtropical, caracterizado por tener un medio ambiente semiárido y frígido con precipitaciones menores a los 400 mm. Las temperaturas del aire son bajas, su promedio anual se encuentra entre 8° a 6° C, los valores medios extremos oscilan entre -2° y 19° C.

La Fisiografía del sector de El Choro manifiesta una llanura de carácter fluvio lacustre del río Desaguadero, el que presenta un relieve topográfico relativamente plano, con pendientes máximas de hasta 2 % en algunos sectores. No existen zonas de serranías ni zonas de microclima, solamente las excavaciones de los canales de riego hacen notar como ríos intermitentes en toda esta región.

La cobertura vegetal actual de esta región en su mayoría cuenta con pastos nativos en un 54% (*Distichlis humilis*, *Suaeda foliosa*, *Orthophyla sp* y

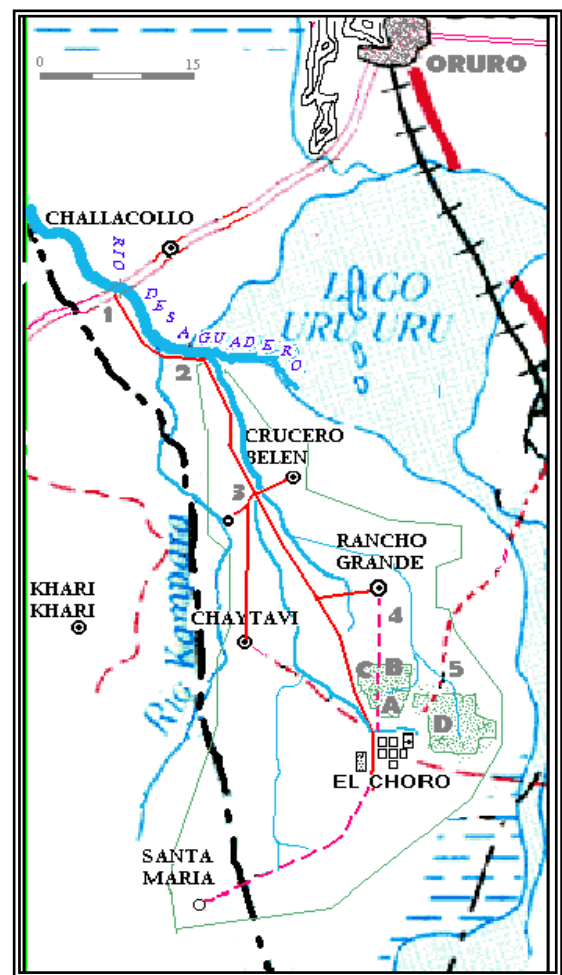


Fig. 1 ubicación del área de estudio (El Choro)

*Stipa ichu*) e introducidas con un 12 % (*Medicago sativa*, *hordeum vulgare*), el restante 34 % representa áreas sin cobertura. Según Veizan E. (1999).

Todo el área de estudio pertenece a la subcuenca del lago Poopó, con el tributario del río Desaguadero como fuente principal de abastecimiento de agua para el riego y el consumo. El lago Poopó y el lago Uru Uru bordea el sector; sin embargo en época del invierno se secan o presentan alto contenido en salinidad imposibilitando su uso para las necesidades de consumo como agua de bebida. Por otro lado, existen pozos y trincheras filtrantes para la extracción de aguas subterráneas que posibilitan cubrir la demanda momentánea del agua sediento de los animales en casos de extrema deficiencia de agua, exactamente cuando no fluye agua por el río Desaguadero producto de la fuerte insolación consecuentemente una fuerte evaporación. Lo contrario sucede en épocas de lluvias, cuyas aguas crecidas forman áreas de inundación en zonas bajas.

## **Metodología**

La concreción del presente trabajo investigativo referente a la evaluación de suelos y vegetación ha sido posible a través de una metodología estandarizada propuesto por Ortiz V. (1994), que comprende tres etapas, ellos son: planeación, ejecución (fases de pre campo, campo y post campo) y evaluación; en combinación con las técnicas de estudio propuesta por la FAO (descripción del suelo) y de entrevistas, comentarios, etc. bajo una dinámica de investigación interdisciplinario, cuyos resultados por orden de factor ambiental se concluye como sigue:

## **RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **Evaluación de la calidad de agua de riego.**

La evaluación y análisis de la calidad de agua que se emplean para el riego en la zona de El Choro, se enfoca en dos partes: una que contempla el río propiamente dicho, y la otra que estudia los canales de riego desde la toma inicial hasta los canales secundarios, y en dos épocas diferentes (época de estiaje y época de lluvias). Los puntos de importancia considerados en este trabajo se observan en la Fig. 1. Los resultados obtenidos sobre la concentración de metales pesados en aguas del río y canales han sido comparados con los valores estándares emitidos por la Organización mundial de la Salud (OMS), y con los valores de clases de agua descrito en el reglamento de la Ley de Medio Ambiente de nuestro país. Previo a esta clasificación también fueron catalogadas al agua de acuerdo a su composición físico químico (pH, RAS, CE y Sólidos), según la clasificación de aguas de riego de Allison (1993).

### **Calidad de agua del río Desaguadero.**

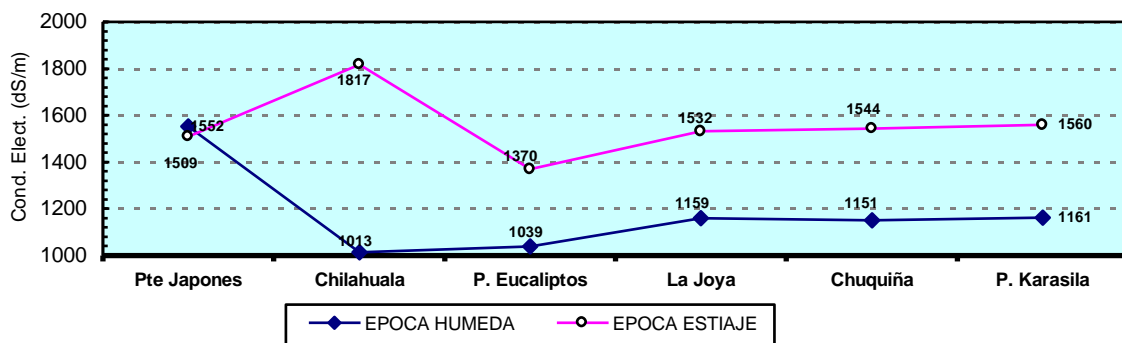
Las aguas del río Desaguadero a lo largo de su desarrollo empeora su calidad, debido principalmente a que el río atraviesa una vasta región del Altiplano con terrenos salinizados por efectos naturales producto de las formaciones geológicas del terciario con contenidos parentales de tipo yesífero y calcáreo (Orsag V. 1993). Por otro lado las minas abandonas existentes en el trayecto del río son fuente de contaminantes durante algunas épocas (lluvias) por el lavado de sus desechos a este río.

El parámetro de la conductividad eléctrica registrado en el periodo seco del río Desaguadero durante las campañas de aforo y medición de caudal (cuadro 1), muestra una tendencia de incremento en sentido de la dirección del flujo (Fig. 2). Sobre todo a partir del sector de Eucaliptos con 1,37 dS/m hasta alcanzar a 1,56 dS/m en el sector del puente Carasila. Estas variaciones de la conductividad expresada y observadas en la Fig. 2, se debe exclusivamente, a que el río Desaguadero atraviesa una región de suelos con procesos de salinización producto de la meteorización y mineralización de los materiales formadores del suelo, que aportan cantidad de sales con diferentes concentraciones catiónicos. Por otro lado en este periodo (época seca), las fuertes insolaciones que suceden en la región provoca afloramientos salinas en la superficie del suelo que también contribuye a la salinización de las aguas del río, consecuentemente a las aguas de riego.

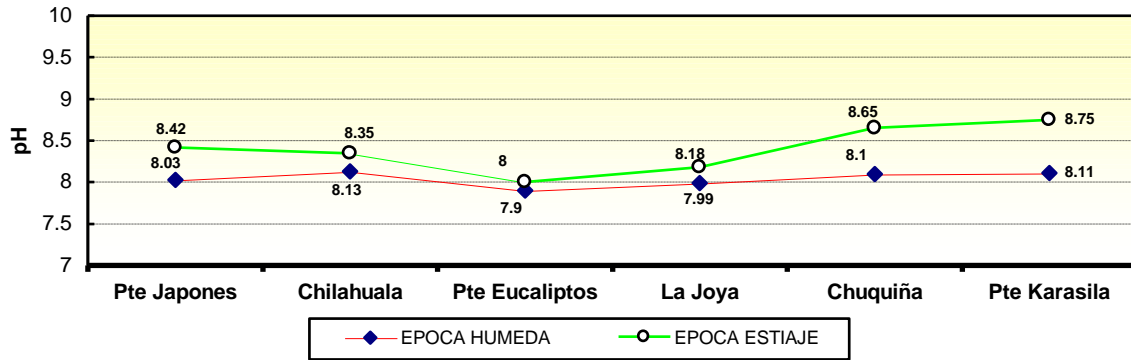
En el período de lluvias, el comportamiento y la evolución de la CE es muy similar a la época anterior, con variaciones decrecientes en el contenido de sales, es decir son disminuidas las concentraciones salinas solubles que arrastra el afluente y que no sobre pasa el valor de 1,50 dS/m en toda la dimensión del río (a partir de Chilahuala), esta variación indudablemente se debe a que las concentraciones de las distintas sales son diluidas por el elevado volumen de las cargas de agua y que además son adicionados otros compuestos de neutralización (cales y sulfatos) que disminuye los valores de la conductividad, produciendo una mejora sustancial de la calidad de agua en esta temporada.

Del mismo modo las variaciones del pH en el periodo seco, evoluciona en el sentido de la dirección del flujo (hacia el sur), en estrecha relación con la comportamiento de la conductividad eléctrica (Figuras 2 y 3). Los valores registrados del pH en esta época, están por encima de 8,0, hasta alcanzar un valor de 8,75 en el sector de Carasila; por tanto, aguas con estos valores de pH son alcalinas y salinas.

**Figura 2.** Evolución de la conductividad eléctrica del río Desaguadero en dos épocas



**Figura 3.** Comportamiento del pH en el río Desaguadero en dos épocas



Para tener una exactitud más precisa de la calidad de agua del río Desaguadero en el presente, se ha visto por conveniente realizar un análisis de laboratorio de las aguas de río en el periodo de lluvias y observar la relación de la conductividad, del pH y de otros parámetros que condicionan la calidad de agua. De acuerdo al cuadro 3, se confirma que existe una estrecha relación del pH con la Conductividad eléctrica y con el volumen o carga de agua del flujo, constituyéndose esta agua de río en CLASE C, dentro del marco de la clasificación de aguas según norma del Reglamento de Ley de Medio Ambiente del MDSMA (cuadro 1).

Por otro lado, se confirma la elevada presencia de sólidos totales (disueltos y en suspensión) en estas aguas del Desaguadero sobre todo en el periodo de las lluvias, producto de las altas tasas de erosión (eólica e hídrica) que se dan en la cuenca del Titicaca y del Desaguadero y estas partículas de erosión son arrastradas por corrientes temporales al río Desaguadero. Por otra parte el agua turbia de esta época (Febrero) se debe también a que algunas obras de toma y sectores del río son meandricos pronunciados, convirtiéndose en verdaderos fosas de lavado de las paredes del río que provocan aún más el incremento en el contenido de sedimentos, hasta alcanzar 10,907 gr/l (sector de la Joya), como se puede apreciar en el cuadro 3.

**Cuadro 3.** Análisis físico-químico de las aguas del río Desaguadero (febrero 1999)

PARÁMETRO	PUNTOS DE OBSERVACIÓN (río Desaguadero)			
	JAPONES	CHILAHUALA	EUCALIPTOS	LA JOYA
PH	8,00	7,60	7,80	8,05
CE dS/m	1,560	1,027	1,068	1,193
S.S. mg/l	6485,24	8691,38	9466,00	10119,41
S.D. mg/l	957,20	625,00	706,30	787,80
S.T. mg/l	7442,44	9316,38	10172,30	10907,21
Na mg/l	197,75	158,00	137,00	175,00
K mg/l	17,38	10,77	11,13	12,53
Ca mg/l	73,00	46,00	50,50	46,00
Mg mg/l	6,06	3,80	3,77	4,13
Cl mg/l	341,29	194,97	181,53	227,14
SO <sub>4</sub> mg/l	112,99	128,81	124,29	97,17

PARÁMETRO	PUNTOS DE OBSERVACIÓN (río Desaguadero)			
	JAPONES	CHILAHUALA	EUCALIPTOS	LA JOYA
CO <sub>3</sub> mg/l	0,00	0,00	0,00	0,00
HCO <sub>3</sub> mg/l	102,48	87,23	92,11	100,04
Alcalinidad	8,4	7,15	7,55	8,2
Dureza total	197,41	124,35	135,51	125,17
<b>CLASIFICACIÓN</b>	<b>Clase C</b>	<b>Clase C</b>	<b>Clase C</b>	<b>Clase C</b>

S. S. = Sólidos en suspensión

S. D. = Sólidos disueltos

S. T. = Sólidos totales

Alcalinidad = mval/l

Dureza total = mg/l de CaCO<sub>3</sub>

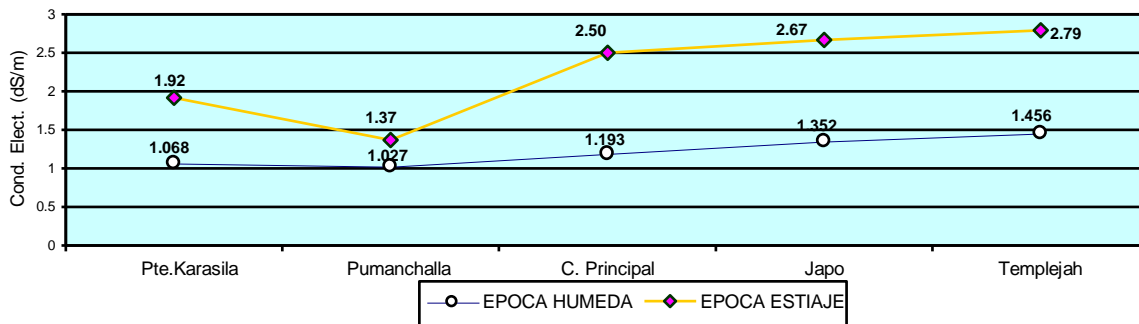
De acuerdo al mismo cuadro (cuadro 3), se puede ver que en esta época, no todos los cationes van aumentando paulatinamente hacia el sur (sector Japonés–Carasila), tal como lo describen otros estudios (proyecto Desaguadero), debido a que no se ha obtenido los datos en toda la cuenca. Solo en el caso de los sólidos totales, sólidos disueltos, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos van aumentando paulatinamente hacia el sur, mientras que las concentraciones de sodio, potasio, cloruros disminuyen.

### Calidad de agua de riego en los canales

La calidad de aguas de riego en el sector de El Choro exclusivamente en los canales (captada a través de tomas del río Desaguadero), varían considerablemente en su calidad. El elevado contenido de sales (Fig. 4), los pHs altos y las concentraciones de diferentes cationes y aniones por encima de lo normal, proporciona al agua de riego en una calidad no deseable tanto para su uso en riego como para el consumo humano; sobre todo en la temporada de invierno (época seca).

Los resultados del cuadro 4, son analizados en el periodo de estiaje (Oct. y Nov. 1998), y clasifican al agua de riego en el orden de C3S2 (medio a alto en salinidad) hasta C4S4 (altamente salina) según clasificación USDA, por su elevado contenido de sales solubles disueltos en las aguas que alcanza a un máximo de 2,79 dS/m (Templejahaira, punto 4 en Fig. 1), es decir con contenidos de 1,78 a 2 gramos de sal por litro de agua. Además la concentración de la RAS cuantificada por la presencia del ión sodio son relativamente considerables, tomando en cuenta que este elemento (Na<sup>+</sup>) puede ser perjudicial en la estructura del suelo. A este respecto, Allison (1993) indica, aguas de esta calidad no pueden ser usadas para riego bajo condiciones ordinarias y es más inadecuada su uso cuando los suelos a regar presentan acumulaciones de sales y de sodio intercambiable en la superficie por causas de impermeabilidad y de falta de drenaje.

**Figura 4.** Evolución de la conductividad eléctrica en los canales de riego en dos épocas



**Cuadro 4.** Composición físico-química de aguas en canales de riego (nov-dic1998 – 1999)

PARÁMETRO	UNIDAD	PUNTOS LOCALIZADOS EN LOS CANALES				
		PUENTE KARASILA	PUMAN CHALLA	CANAL PRINCIPAL	JAPO TARU	TEMPLE JAHUIRA
pH		8,50	8,40	8,90	8,23	8,55
C.E.	dS/m	1921,00	1373,00	2500,00	2670,00	2790,00
S.T.	mg/l	2236,42	2246,56	1635,50	2370,05	1820,10
Na	mg/l	298,00	192,00	482,40	315,00	487,50
Ca	mg/l	81,50	61,00	65,50	87,95	76,90
Mg	mg/l	6,30	4,60	14,50	6,50	16,00
K	mg/l	19,50	17,50	26,40	20,60	32,00
Cl	mg/l	375,34	264,11	584,00	386,60	630,00
SO4	mg/l	131,90	105,52	195,31	149,51	192,70
CO3	mg/l	99,00	45,00	36,00	96,00	30,00
HCO3	mg/l	123,63	106,75	201,30	149,58	213,50
Dureza total	mg/l	219,42	163,80	199,79	135,84	232,00
RAS	meq/l	8,54	6,37	14,01	8,72	13,17
<b>CALIDAD</b>	<b>C3S2</b>	<b>C3S2</b>	<b>C4S4</b>	<b>C4S2</b>	<b>C4S4</b>	

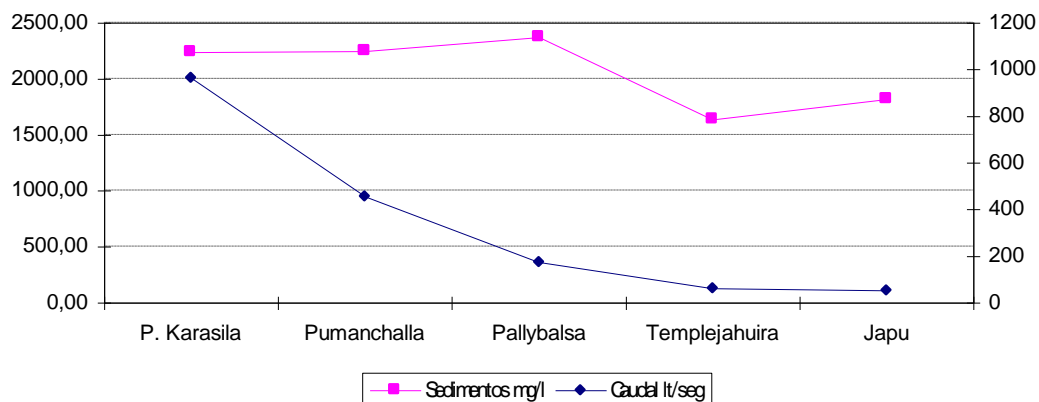
Las causas del incremento de la conductividad (sales solubles) y del pH se deben particularmente a la disminución del caudal y el volumen de agua, producto de la longitud que comprenden los canales (36 km) y de la demanda hídrica existente en el sistema; por otro lado se debe también las causas porque atraviesan diferentes tipos de suelo. Estos aspectos inciden de alguna manera sobre la calidad de esta agua.

Estos mismos parámetros (CE, pH y RAS) en la temporada de lluvias disminuyen en sus valores, mejorando sustancialmente la calidad de estas aguas de riego, clasificándose en los cuadrantes C3S1 y C3S2, que están en el orden de moderado a alto en salinidad y de bajo a medio en relación con el sodio. Por tanto dichas aguas pueden usarse en suelos cuyo drenaje sea eficiente a través de prácticas agrícolas especiales, la probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable deber ser considerado siempre de cuidado; sin embargo aguas de esta época no se emplean para

riego por razones de las intensas lluvias que no condicionan una necesidad de riego, además que de acuerdo al elevado contenido de sólidos no son apropiadas para el riego.

Otro de las propiedades (propiedades físicas), que con más notoriedad se manifiesta es la turbidez, por la cantidad de sólidos totales que arrastra el agua, otorgando una coloración pardo claro. Es necesario tomar en cuenta esta situación por el posible impacto sobre los suelos del área. En estudios llevados a cabo en EUA, se ha demostrado que cuando los aportes de limo sobre el suelo son importantes, pueden disminuir significativamente la permeabilidad de los suelos y hacer la irrigación más difícil. Estos aportes de sólidos totales en la zona de estudio esta en el grado de 1685,1 gr/m<sup>2</sup>/año (sector Japo) y 1100,73 gr/m<sup>2</sup>/año (sector Templejahuiria, punto 4) que son significativamente indeseables para los suelos y más aún en suelos con permeabilidad deficiente que puede inducir más sobre el movimiento del agua a través del perfil y por consiguiente sobre el lavado adecuado de sales; los aportes de estos sólidos equivaldrían una adición de 16 y 11 kg de limo y arcilla en los próximos 10 años de riego. En el periodo de lluvias esta concentración de sólidos es más considerable (10172,0 gr/l) motivo por el que no se hace uso para riego (Fig. 5)

**Figura 5.** Evolución del sedimento en función del caudal en el canal de riego (febrero 1999)



Respecto a los cationes como el Ca, Na, Mg y K expresadas en mg/l, tiene valores considerables en el periodo estiaje. El caso del sodio está por encima de 200 mg/lt (valor recomendado por MDSAM), por tanto con tendencia creciente según avanza el curso del río; estos valores de Na<sup>+</sup> pueden ser perjudiciales para la salud humana y para el sistema suelo-planta, y hasta nocivos cuando están con contenidos altos, como el caso de las aguas de riego provenientes del Desaguadero.

El contenido de Ca, Mg sufren variaciones que no son significativas; que sin embargo son importantes en el sentido de equilibrio que contrarresta en alguna medida la salinidad y de otros elementos perjudiciales, además no sobrepasan los 200 – 300 mg/lt que condicionan como límites para aguas normales.

Los contenidos de cloruros en aguas de riego (En época seca) están por muy encima de 1,5 a 2 meq/l (52,5 – 70 ppm) recomendadas por Allison (1993) y López R. (1992) y para aguas de riego de hasta 5 meq/l (175 ppm). Según el contenido de cloruros en el río Desaguadero deben ser restringidos para



el riego, debido a la incidencia de los cloruros sobre las plantas en el metabolismo y el potencial osmótico, a pesar de la parte positiva de los electrólitos sobre las propiedades físicas del suelo.

### Contenido de metales pesados en aguas del río desaguadero y canales de riego

La calidad de agua también esta determinada en función a la concentración de elementos tóxicos como el boro, el cloro y de metales pesados como el níquel, manganeso, plomo, cobre, mercurio, el arsénico entre otros, que en concentraciones fuera de los valores del rango establecido como normal tiene repercusiones negativas. Los valores siguientes son el contenido de estos iones presentes en el agua de riego y de consumo domestico.

**Cuadro 5.** Contenido de metales pesados en aguas empleadas para el riego en la zona del Choro en dos épocas

ELEMENTO	Karasila (P.1)		Pumanchalla (P.2)		Pallybalsa (P. 3)		Japo (P.4)		Templejahuira (P5)	
	seca	lluvia	seca	lluvia	seca	lluvia	seca	lluvia	seca	lluvia
Mn (ppm)	- 0,010	0.310	- 0,010	6,900	- 0,010	4,900	- 0,010		- 0,010	
Zn (ppm)	- 0,005	0.150	- 0,005	0.480	- 0,005	0,436	- 0,005		- 0,005	
B (ppm)	0,957	1,078	0,708	1,070	1,547	1,140	1,065		1,786	
Cd (ppm)	- 0,005	- 0,005	- 0,005	0,009	- 0,005	0,009	- 0,005		- 0,005	
Cu (ppm)	0,013	0,040	0,012	0,320	- 0,006	0,250	0,014		0,008	
P (ppm)	0,212	0,116	0,107	0,531	- 0,016	0,274	0,190		0,207	
Fe (ppm)	0,065	7,250	0,048	12,240	0,017	12,160	0,387		0,045	
Pb (ppm)	- 0,040	- 0,050	- 0,040	0,080	- 0,040	0,070	- 0,040		- 0,040	
Ag (ppm)	- 0,020	- 0,050	- 0,020	- 0,050	- 0,020	- 0,050	- 0,020		- 0,020	
Co (ppm)	- 0,007	- 0,007	- 0,007	0,059	- 0,007	0,046	- 0,007		- 0,007	
Cr (ppm)	- 0,007	- 0,007	- 0,007	- 0,007	- 0,007	- 0,007	- 0,007		- 0,007	
Ni (ppm)	- 0,010	0,020	- 0,010	0,090	- 0,010	0,078	- 0,010		- 0,010	
Sb (ppm)	- 0,005	- 0,005	- 0,005	- 0,005	- 0,005	- 0,005	- 0,005		- 0,005	
As (ppm)	0,244	0,120	0,254	0,065	0,536	0,101	0,295		0,660	
Hg (ppm)	- 0,001	- 0,001	- 0,001	- 0,001	- 0,001	- 0,001	- 0,001		- 0,001	

NOTA: Los valores negativos implican por debajo del limite de detección

### Contenido de arsénico

La entidad internacional OMS y el reglamento del MDSMA exige que las aguas deben contener un valor no superior a 0,05 ppm del ión arsénico, sobre todo en aguas de consumo. En épocas de estiaje las aguas de riego de los canales provenientes del río Desaguadero se registra por encima de estos valores guía. El caso del punto de Templejahuira (apertura parcelaria) se registra al As en 0,68 ppm, es decir 13 veces más de lo requerido, por lo que manifiesta una probabilidad de contaminación por del arsénico, clasificando al agua según norma de MDSMA en clase D. Las concentraciones de este elemento en épocas de lluvia sufre un decremento, fundamentalmente por el incremento de los iones de Ca y Fe; coincidencia con el criterio de Koch (1987) citado por Dorronsoro C. (1999), en el sentido estricto de que en fases acuáticas el arsénico forma precipitados insolubles con una cantidad

de compuestos (Ca, S, Ba, Al y Fe), lo que da por resultado la eliminación de los compuestos de arsénico del agua.

Los niveles registrados en la época seca, deben ser considerados de cuidado, teniendo en cuenta que este elemento no tan indispensables para el desarrollo de las plantas y sin importancia para el organismo humano y animal. Este elemento (As), al ser incorporado ya sea por inhalación o por ingesta en el organismo de un ser vivo provoca ciertos desordenes gastrointestinales, calambres, entre otros afecciones.

### **Contenido de Boro**

De acuerdo a lo establecido por la OMS, el nivel de Boro en agua para consumo es de 0,3 a 1 mg/l y según el reglamento del MDSMA es de 1 mg/l, por lo que todas las muestras analizadas en los dos periodos se encuentran por encima de estos valores.

El boro en agua en el periodo de estiaje es relativamente mayor con relación a la época de lluvia, y se atribuye esta causa porque el boro por lo general esta en conjunción en parte con la solubilidad salina del agua. En el periodo de lluvias, el boro tiene comportamiento muy similar al periodo anterior con disminuciones mínimas.

De acuerdo a la calidad de agua necesario para riego se acepta una máxima de 1,25 ppm de boro en agua para aquellos cultivos tolerantes a esta toxicidad. Si bien existe boro en todas las aguas naturales, desde trazas hasta varias partes por millón, no deja de ser importante para el crecimiento de las plantas, y tóxico a la vez cuando excede el nivel optimo. A este respecto Allison E. (1993) indica que el cultivo de alfalfa logra su desarrollo máxima si el agua de riego posee de 1 a 2 ppm de boro. Por tanto las aguas de riego provenientes del Desaguadero se encuentran dentro el rango requerido para el cultivo de alfalfa de la zona de El Choro, estableciéndose como normal, y fuera de lo normal para el consumo directo como agua de bebida.

### **Contenido de Manganeso**

Se considera al manganeso como peligro por toxicidad cuando tiene valores por encima de 0,5 mg/l según la OMS y de 1 mg/l según el MDSMA.

Los valores obtenidos de 6,9 y 4,9 ppm en dos puntos del canal (Pumanchalla, punto 2 y Pallybalsa punto 3) están por muy encima de los valores aceptable, correspondiente a los análisis en época de lluvia; el fenómeno se presume a que estos cationes se entrelaza con facilidad en las partículas coloidales que arrastra el río en esta temporada.

En el periodo de estiaje o seco no se detecta concentraciones de manganeso, por situaciones adversas al periodo anterior. De cualquier forma no se indica la gravedad de contaminación por parte de este elemento en el cuerpo de agua de dicho río, teniendo en cuenta que el manganeso en condiciones de mínima concentración participa como oligoelemento en las funciones vitales de la planta y de los animales.

## **Contenido de Plomo**

El plomo esta por encima del valor limite (0,05 ppm), sobre todo en épocas de lluvias debido a la presencia de partículas arcillosas, de carbonatos, de hidróxidos de Fe y Mn que juegan un papel importante en la retención de este ión plomo. En el criterio de Dorronsoro C. (1999), indica que los cuerpos de aguas superficiales constituyen trampas de acumulación para los compuestos de plomo. Los compuestos insolubles se hunden y se adsorben en los sedimentos o se adhieren en suspensión (especialmente a partículas de arcilla)

Las concentraciones de plomo que se destacan en épocas de lluvia en algunos puntos del río Desaguadero pueden presentar problemas de contaminación a los suelos de regadío y a cultivos de la zona, más aún cuando se trata como agua de bebida. Siendo así, aguas de esta temporada corresponden a la Clase D según norma de OMS y MDSMA, Por tanto se debe tener en cuenta que el aporte por las aguas de éste elemento a los suelos agrícolas puede repercutir en alguna medida su acumulación. La ausencia de este metal en ciertos puntos se arguye, que en épocas de estiaje las aguas del río no arrastran sedimentos u otras sustancias provenientes del lavado.

## **Contenido de Níquel**

La presencia del elemento níquel en época de estiaje o seca es nula, en tanto que en época de lluvia, manifiesta un incremento inclusive por encima de lo establecido por las dos entidades (OMS y MDSMA), la consecuencia se debe al contenido de partículas en suspensión que acarrea el agua de río y del factor de pH, tanto más bajo es el pH más elevado se tendrá la concentración del Ni y otros metales pesados.

No es posible definir el grado de peligrosidad por parte del elemento níquel en esta agua, debido a la particularidad de elemento esencial para el desarrollo de los cultivos, teniendo en cuenta que los suelos de regadío tienen concentraciones bajas de este elemento. Sin embargo como agua de bebida se debe tomar en cuenta estas concentraciones, que están por encima de 0,05 ppm, por tanto deben ser restringidas su uso para consumo.

## **Niveles de Cadmio**

El elemento cadmio apenas se detecta en el periodo de lluvias en los puntos de Pumanchalla y de Pallybalsa con 0,009 ppm, encima del valor del limite permisible que es de 0,005 ppm de acuerdo al OMS y a las clases de agua del MDSMA. A este aspecto, Dorronsoro C. (1999), evalúa al Cd en los cuerpos de agua superficiales y subterráneas e indica que están adsorbidos a partículas en suspensión, y por acción de los agentes formadores de complejos pueden ser removidos de los sedimentos y removilizaciones. El mismo Dorronsoro afirma que la toxicidad del Cd para los organismos depende de entre otros factores del contenido de calcio en el agua. En general cuanto mayor el contenido de calcio en el agua, tanto menor será el efecto tóxico del cadmio sobre los organismos. En ese entendido, aunque sea mínima la proporción del Cd en las agua de riego del río Desaguadero puede ser peligroso si no se toma en cuenta en detalle el grado de afección que podría ocasionar a los suelos por efecto de acumulación.

## **Niveles de Cobre**

El cobre en concentraciones por encima de 1 ppm, se considera de peligrosidad, ya que rebasa el límite aceptable. En el caso de las aguas de riego del Desaguadero presentan concentraciones de cobre; con más acentuación en los periodos de lluvias que en el periodo seco, sin embargo no sobre pasan el límite aceptable. El mismo Dorronsoro (1999) indica que el cobre se precipita en agua salada, lo que explica el escaso contenido de cobre en este tipo de agua (clase S3C4). Por otro lado no se cuenta en nuestro medio con parámetros indispensables que pudieran definir la concentración de cobre como importantes o peligro en el curso de las aguas para el uso de riego, tomando la importancia y la necesidad que demande las especies de vegetales para su desarrollo, aunque en proporciones de traza.

## **Niveles de Zinc**

La calidad de agua del río Desaguadero respecto al contenido de zinc esta clasificado en la clase C de acuerdo al reglamento del MDSMA en el periodo de lluvias que sobrepasan los valores de 0,2 ppm; sin embargo se encuentra dentro el rango aceptable según norma de OMS (5ppm).

Entre tanto en el periodo de estiaje no se detecta la presencia del zinc en esta agua, precisamente por el bajo contenido de sedimentos totales que facilita la adsorción de estos metales.

Por otro lado, debido a la fina capa de oxido con que se recubre el zinc permanece estable tanto en agua dulce como en agua salada.

## **Evaluación del impacto de riego sobre la acumulación de metales pesados en los suelos**

Previo a evaluar el estado actual de los suelos por acumulación de metales pesados, es muy conveniente analizar y describir las características físico químico y biológicas de los suelos conjuntamente el impacto del riego en la salinización y sodificación de los mismos y de las propiedades particulares que gobiernan y facilitan en la capacidad de adsorción de ciertos metales o elementos y que conllevan a perjudicar el desarrollo consecuente de productividad agrícola.

## **Caracterización e impacto del riego en la salinización y sodificación de los suelos de “EL Choro”**

Las cuatro zonas descritas y de estudio de suelos comprende: Zona A (Templejahuiria), zona B (Lastaca), zona C (Templejahuiria) y zona D (Japo – Jankopata) (ver Fig. 1). En estos suelos estudiados, se observa una heterogeneidad textural, especialmente en la distribución a lo largo de los perfiles, lo que aumenta la complejidad del trabajo de descripción por impacto de riego, y así poder emitir un juicio preciso respecto a sus características. Para describir y evaluar los suelos afectados por el riego en el sector fue necesario conocer también algunos aspectos importantes sobre el manejo de los cultivos y principalmente del sistema de riego por sus características especiales, dichos aspectos se tornan en un principal influyente en las modificaciones y cambios que sufre el sistema edáfico.

Considerando que los suelos de toda la región tienen una formación a partir de sedimentos depositados por los cauces fluviales que tributan a la cuenca. Estos tributarios, inicialmente arrastran partículas y sedimentos aluviales de origen calcerífero del terciario a partir de las zonas altas de montañas que rodea a la gran cuenca, dando origen a la formación de suelos recientes (jóvenes) del tipo fluvio lacustre, otorgando un aspecto de llanura planicie (Orsag 1993). Este tipo de formación da origen a muchas propiedades muy particulares (PSI, CE y pH) que se manifiestan en estos suelos producto del impacto de riego.

Por otro lado, en estos suelos se observan signos de erosión hídrica y eólica. La erosión eólica laminar, los cuales son efecto de las condiciones adversas del clima reinante como los fuertes vientos de las épocas invernales, más aun cuando la cobertura vegetal es pobre tiende a arrastrar partículas de suelo dejando a la planicie en un ente degradado.

### **Contenido de metales pesados en los suelos**

Los metales pesados y otros elementos tóxicos que se observan en los suelos, en gran parte se debe a que estos son producto de actividades naturales y en alguna medida de forma antrópica. Los valores que se observan a continuación en los cuadros y figuras siguientes define la posición de estos metales en los suelos.

### **Niveles de cobre en los suelos**

El comportamiento del cobre en la mayoría de los perfiles descritos son muy similares y variables a la vez, cuyas concentraciones en mayor proporción se encuentran en los horizontes más superficiales, tanto en los perfiles testigo como en los perfiles afectados con varios años de riego (excepto en la zona C (Templejahuir), este comportamiento es atribuible al alto contenido de la CIC y de M.O., que se registran en los estratos superficiales. Por otro lado el contenido de Cu disminuye a medida que avanza la profundidad de los estratos (cuadros 6,7,8 y 9).

El cobre registra una tendencia parcial de acumulación en los perfiles con riego respecto al testigo (Fig.8), gracias al efecto de formación de complejos con ligandos orgánico solubles. El sentido descendente del Cu en los estratos inferiores en los suelos de la zona B (Lastaca) y D (Japo), se debe a factores que promueven la precipitación del Cu hacia los estratos inferiores y a la solubilidad asimilativa por las plantas que predominan en estas áreas. En el caso particular de la zona D, donde se observa mayor connotación del ión Cu se debe a la predominancia de la clase textural arcillosa del tipo haloisita y montmorillonita, facilitando una mayor adsorción e intercambio catiónico. Este particular se observa en las Fig.9. Un estudio llevado a cabo por Dorrnsoro C. (1999), demuestra los siguientes criterios: El cobre queda fuertemente atrapado por intercambios inorgánicos, y cuando aumenta el pH se forman compuestos; la solubilidad del cobre en el suelo es mínima con pH 5-6; el cobre es adsorbido firmemente en la arcilla, es decir se acumula en los estratos arcillosos.

La acumulación del cobre en todo el sector de estudio esta por debajo del limite de máximo tolerancia (100 ppm), sin embargo existe una relativa demasía respecto al promedio del rango común (20 ppm). Concluyendo que no existe contaminación del cobre por efectos de riego, sino que se observa un peligro de acumulación en áreas de textura arcillosa sin años de riego por causas que se presume netamente natural.

## **Niveles de plomo en los suelos**

El efecto acumulativo del plomo en suelos de toda el área de estudio por los años de riego es evidente, como se observa en los cuadros 6,7,8 y 9 de las zonas respectivas; siendo así que los suelos de la zona A (Templejahuirá) parte de un valor de concentración de plomo de 24 ppm del suelo sin riego y alcanza a 25 ppm en suelo de más 20 años de riego; en la zona C (Templejahuirá) de 21 a 24 ppm, y muy similar en la zona D (Japo) de 32 a 33 ppm, lo que existe un ascenso acumulativo en función a los años de riego, con una tasa de 0,035 a 0,2 ppm de Pb por año (en 35 y 15 años respectivamente), lo que podría disponerse un incremento de 1 a 6 ppm en los próximos 30 años. El fenómeno se debe principalmente a que los suelos en épocas húmedas recibe aguas con bastante carga de sedimentos con contenidos de plomo, y estas permanece en los horizontes superficiales, por lo que los suelos resultan ser una importante trampa para los compuestos del Plomo.

García I. Y Dorronsoro C. (1999) explica, que es estable el Pb cuando se presenta en forma de  $PbCO_3$ , y se hace más inestable si las condiciones ambientales con ácidas, por tanto en suelos con mínimas cantidades de  $CO_3$  puede favorecer a la estabilidad en forma soluble, y esta a su vez cuando esta en condición de ión complejo se hace disponible para las plantas y que puede ser asimilado en la misma medida que otros elementos y pasa a ser perjudicial en su crecimiento y a la vez entra en la cadena alimenticia del hombre. Otro estudio afirma, que una contaminación adicional se produce cuando se distribuyen lodos y/o sedimentos con contenidos de Pb sobre la tierra de cultivo (Guía de Protección Ambiental del BMZ 1999), lo que sucede este fenómeno en épocas de inicio de las lluvias en el sector de El Choro.

Los suelos normales presentan solamente hasta 2 ppm, debido a su poca movilidad, disponibilidad y propiedades tanto del metal y del suelo. Cuando esta por encima de 5 ppm en el suelo ocasiona anomalías en la vegetación, y son tóxicos cuando sobrepasan su concentración a 80 ppm. Diremos entonces, que el elemento Pb está en una tendencia acumulativa en función a los años de riego en los suelos de estudio (Fig.7). Dada a su capacidad acumulativo y antidegradante en distintos fuentes por efecto de los factores acumulativas del suelo (Fig.9), estos suelos pueden considerarse moderadamente peligroso si no se efectúan trabajos de rehabilitación continua.

## **Niveles de arsénico en suelos**

El As se presenta en proporciones de consideración, los contenidos registrados son superiores a los valores establecidos como límites de máximo tolerante (20 ppm), en todos los casos y/o tipo de suelos. Es decir existe una progresiva acumulación del ión arsénico en los suelos con riego conforme pasan los años (excepto en la zona B), sin embargo el comportamiento del As en estos suelos es un tanto variable. En suelos testigo el As tiende a incrementarse según aumenta la profundidad de los estratos, como efecto directo del pH y de las sales en consecuencia (Así lo demuestran las Fig.9); en cambio en suelos con incidencia de riego existe decremento de concentración de As según se pronuncia la profundidad tal como se observa en los cuadros 6, 7 y 9) por efecto del pH y de la CE en todo caso. El factor pH conjuntamente con la CE, son factores esenciales para la acumulación y distribución del As en los suelos ha medida que exista tendencia a la alcalinidad del pH y de salinidad de la CEe, afirmando las concepciones de García I. (1999)

concretando que los elementos As, Mo y Cr tienden a estar disponibles o en disolución a pH alcalinos.

El caso particular de la zona D (Japo), es más notoria la polución y/o contaminación por el As en los suelos a medida que transcurre los años de riego, cuyos valores de 27, 44 y 48 ppm son duplicados a los límites permisibles (20 ppm) propuesto por la FAO; de forma similar se observa en las otras zonas restantes. Si bien el perfil testigo esta minimamente encima del nivel permitido, los otros perfiles muestran tendencia de contaminación por el metal arsénico, por lo que presenta un peligro de transferencia a la cadena alimenticia si es absorbido por las plantas. Por tanto es innegable la acumulación del As en los suelos de región del Choro, teniendo en cuenta, más aún si estos suelos son sometidos a riegos continuos con aguas con contenidos también en varias ppm del elemento As, y este aspecto sucede precisamente en periodos cuando se hace más necesario el uso de agua (época de estiaje).

### **Niveles de cadmio en los suelos**

La concentración del metal cadmio en suelos de las cuatro zonas, presentan niveles por debajo del rango común y muy por debajo de los valores del límite permisible, inclusive no se detecta siquiera una mínima concentración en suelos de la zona A y B. Una ligera acumulación del Cd se presencia más en los subsuelos de las zonas C y D (cuadros 8 y 9) con niveles de 0,7, 0,6 y de 0,6, 0,8 ppm respectivamente, la presencia más notoria del Cd se detecta en el subsuelo (30-50 cm), mostrando que el horizonte de acumulación para el cadmio es la rizosfera (horizonte de raíces), con un pH de neutro (7,0) a ligeramente alcalino. La retención del ión Cd en muchos suelos se presume una dependencia del contenido del álcalis intercambiable, debido a que no absorbe a partículas no orgánicas del suelo.

De acuerdo a su característica como metal pesado del Cd, y con el sustento teórico de Codina & Cols (1993) y de la Guía de Protección Ambiental del BMZ (1999). La disponibilidad del cadmio es mínima con un pH neutro; al disminuir el pH del suelo aumenta la asimilación del cadmio por parte de las plantas, en tanto que al incrementar el pH se reduce la disponibilidad y asimilación como los suelos en cuestión de estudio. Por tanto, los valores detectados nos lleva a deducir que este elemento no presenta problema como elemento contaminante. Sin embargo se observa en los perfiles de la zona D una concentración con tendencia de incremento por este metal, la razón se debe a que dicha zona es influenciada con el mayor aporte en volumen de agua lógicamente con contenidos de este metal en distintos periodos de riego.

### **Niveles de Níquel en suelos**

La mayor concentración acumulativa de níquel se registra en el perfil P-10 de la zona D (cuadro 9) de 2 años de riego con 29 ppm, cuyo valor esta por encima de los valores comunes (2 ppm), y a la mitad por debajo del valor de máxima tolerancia para suelos agrícolas (50 ppm). Este fenómeno acumulativo se observa en los primeros años de riego de todos los suelos, precisamente es en éstas etapas del crecimiento vegetativo los suelos alcanzan un mayor porcentaje en materia orgánica, favoreciendo la presencia de este elemento, todo lo contrario sucede en suelos con mayor riego y sin riego.

La tendencia acumulativa esta sujeto al pH del suelo. Dorronsoro C. (1999), atribuye que en suelos de pH menor se incrementa la desorción y aumenta el contenido de este elemento en la solución del suelo, además depende su comportamiento de las propiedades propias de este ión (electronegatividad), es decir que la disponibilidad de catión níquel disminuye, por lo general al aumentarse el pH y el contenido de arcilla. La contaminación por el metal níquel en los suelos de las zonas de estudio es negativo, como se puede observar en los cuadros de comparación, el metal se encuentra por debajo del valor de máxima tolerancia. La tendencia acumulativa es una probabilidad posible por cuestiones de riego según pasan los años, como se observa en los suelos de la zona D, donde los perfiles con riego tienen incremento de níquel respecto a los terrenos sin riego.

### **Niveles de zinc en los suelos**

El comportamiento del zinc es similar al elemento cobre, no se manifiesta variabilidad pronunciada entre los perfiles testigo y los afectados con riego, sin embargo al comparar entre las cuatro zonas la concentración de zinc, la zona D (Japo) es la que presenta un elevado concentrado de zinc con relación a los otros, tanto en el perfil testigo con en los afectados con riego. El fenómeno se estima que se debe a una incidencia por el riego y por las inundaciones anteriores registrados en mayor grado con relación a las otras zonas. Otra particularidad que muestra el suelo respecto a este metal, es su acumulación acentuada en los perfiles superiores que en los inferiores, este estrato caracterizado por una textura más arcillosa tiende a adsorber al zinc al igual que otros metales descritos en las figuras 15, no se distingue la influencia salina sobre este elemento, por su propiedad particular de formar una fina película de oxidación insoluble bajo condiciones normales.

## **CONCLUSIONES**

La calidad de agua del río Desaguadero a lo largo de su trayecto es catalogada en CLASE C, fundamentalmente por el elevado contenido de: sólidos disueltos y solubles, pH, sales, cloruros y de algunos metales producto del proceso natural de meteorización y de las formaciones geológicas del terciario con contenidos parentales de tipo yesífero y calcáreo. En los canales de riego, las aguas provenientes del río Desaguadero se agudiza aún más en su calidad respecto al agua de río, sobre todo en época cuando se necesita hacer su uso (época seca) al incrementarse el contenido: de sales solubles (2,0 gr/lit de sal), de sustancias alcalinas (pH > 8,0), de algunos metales y de la RAS; constituyéndose estas aguas de riego en clase C3S2 hasta alcanzar a la clase C4S4 que limitan su uso para irrigaciones.

Los metales pesados en las aguas de riego detectados en el periodo de lluvia, se encuentran con concentraciones que están por encima de los valores permisibles como en los casos de: As, Pb, Cu, Ni, Cd y Zn adheridos y adsorbidos a las partículas cambiables de sedimentos solubles que arrastra en elevada cantidad el agua de río en este periodo. En cambio en el periodo seco se registraron solamente al As, Fe, Cu y B, de los cuales el As, Cu y el B son las que tienen concentraciones muy elevadas que están por encima de los valores de máximo tolerancia.

Los suelos de la zona de El Choro, actualmente sufren modificaciones en sus propiedades (físico – químicas y biológicas) por efecto del riego con aguas de la calidad descrita. Si bien, y en parte el riego favorece a la lixiviación de las sustancias solubles; pero también se advierte en alguna medida



la acumulación de las mismas sales y en particular del sodio, consecuencia de ello sufre una degradación paulatina por salinidad y sodicidad. Respecto a la concentración de metales pesados por el impacto de riego en los suelos de la zona, se evidencia una acumulación de algunos elementos metálicos como el As, el Pb, el Zn, el Cr, el Mn y el Ni, conforme suceden los continuos riegos en función de los años de incidencia, y muy particularmente en la zona D (Japo) cuyas concentraciones son las más elevadas respecto a las otras zonas. Esta situación acumulativa de los metales en el suelo es producto del aporte del agua con contenidos metálicos y estos a su vez son adsorbidos por el contenido de la clase textural (arcilla), de la capacidad de intercambio (CIC) y de otros factores que caracteriza al suelo de la región y puestos a disponibilidad (probable) por la variabilidad del pH hacia las plantas.

En el caso de los vegetales, *Distichlis humilis* y *Medicago sativa* se detectaron algunos elementos metálicos sin importancia fisiológica como el Cd, Pb y el As, y con mayor contenido en la especie nativa (*distichlis*); hecho que probablemente se deba al aporte por las aguas de riego con contenidos metálicos por una parte, y por otra, que los suelos también favorecen a la absorción de estos elementos a las plantas. El caso particular del Pb fue detectado su contenido en la especie nativa sin incidencia de riego; cuestión asumida en el sentido de que el plomo en la vegetación está en forma de plomo atmosférico que no son lavados por el riego como sucede con las especies sometidas al riego, y no tanto así por el mecanismo de absorción del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALLISON, FERMIN. E. 1993. Estudio de Suelos Salinos y sus Características. Editora Melien. México. pp 23-56.
- BALDIN D. DORIS. 1995 Agua, Minería y Contaminación (Caso Southern Perú). Ediciones Labor Ilo - Perú pp. 339 – 350.
- BEAR E. FIRMAN. 1969 Los Suelos en Relación con el Crecimiento de los Cultivos. Ediciones Omega. Barcelona España pp. 292- 306.
- CHAPMAN H. Y PRATT P. 1979 Métodos de Análisis para Suelos, Plantas y aguas 2ª impresión México Editorial Trillas.
- CODINA & COLS 1993 Arch. Enviroment Contamination Toxicologic printed USA 2: 250 - 254.
- COLQUE ELISEO. 1987. Estudio de factibilidad para la Implantación de Vertederos y Encauces en El Choro, CORDEOR-CEE Oruro-Bolivia.
- DINCHEV DINCHO. 1972. Agroquímica. Ediciones Revolución. Instituto Cubano, Habana Cuba pp. 155 – 190.
- DORRONSORO C. 1999 Contaminación de Suelos por Diferentes Fuentes [www.edafología/contaminación](http://www.edafología/contaminación) Madrid España.
- <http://www.cepis.org/> 1999. Introducción; y Uso de Aguas Residuales Tratadas en Agricultura y Acuicultura. CEPIS - OPS/OMS.
- <http://www.fao.org/> 1999. Desarrollo Sostenible, Metodología de Identificación y Evaluación de Riesgos Para la Salud en Sitios Contaminados. FAO-UNESCO.
- HUMANITY DEVELOPMENT LIBRARY 2,0 – UNESCO 1999 Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Guía de Protección Ambiental Tomo III <http://payson.tulane.edu:8888>.

LEDEZMA S. RUBEN 1995 Influencia del Riego en los Procesos de Salinización y Sodificación en Suelos de la Provincia G. Villarroel. TESIS DE GRADO, Facultad de Agronomía UMSA. La Paz - Bolivia

MINISTERIO DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE 1996 Programa Nacional de Lucha Contra la Desertificación y Sequía (PRONALDES) Documento Oficial. La Paz - Bolivia.

MINISTERIO DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE. 1996 Subsecretaría de Medio Ambiente, Reglamento a la Ley del Medio Ambiente. La Paz - Bolivia

ORSAG C. VLADIMIR. 1993 Consideraciones Sobre la Contaminación Química de los Suelos Circunlacustres al Lago Poopó. (PELT-Bolivia) La Paz.

PRADA P. NELSON. 1997 Efecto del Riego con Efluentes Urbanas Tratadas Sobre la Salinización de Suelos y Acumulación de Metales Pesados. TESIS DE GRADO Escuela Militar de Ingeniería (EMI), La Paz – Bolivia.

SILES CANGAS GABRIELA. 1997. Contaminación de Suelos por Minería y Metalurgia en la Ciudad de Oruro. TESIS DE GRADO Facultad de Ciencias Puras y Naturales (UMSA) La Paz - Bolivia p. 65.