

EVOLUCION DEL BALANCE HIDRICO INVERNAL EN DIFERENTES PARCELAS DE DESCANSO EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO

*J.J. Vacher, I. Brugioni, T. T. Fellman
ORSTOM, Casilla 9214, La Paz*

Resumen

En el altiplano, la agricultura se caracteriza por tener riesgos muy elevados de sequía y de helada. Frente a estas limitaciones, la fecha de la siembra y el contenido de agua en el suelo en las primeras fases de desarrollo de cultivo serán determinantes para el rendimiento. Con el objeto de ayudar a determinar recomendaciones técnicas para un mejor uso de agua del suelo por las plantas, se analiza, en este trabajo, la evolución del balance hídrico durante la época invernal seca en diferentes parcelas de descanso y de postcosecha.

Desde abril hasta octubre de 1987 se analizaron diferentes componentes del balance hídrico a partir de mediciones neutrónicas y tensiométricas. Los resultados obtenidos subrayan la poca variación del agua almacenada en el suelo, debido a una evaporación y una evapotranspiración muy reducidas (inferiores a 1 mm/día) hasta en el caso del descanso con pastizales. Las diferencias observadas en el contenido de agua en el suelo entre las diferentes parcelas al final de la época de lluvias se mantienen hasta la siembra, después de la temporada invernal. A fin de mejorar las condiciones hídricas en el suelo para el cultivo, parece más oportuno estudiar las posibilidades de aumento del almacenamiento de agua durante la época de lluvias, con diferentes fechas y diferentes tipos de labranza, que tratar de reducir las pérdidas durante la época seca invernal.

EVOLUTION DU BILAN HYDRIQUE HIVERNAL SUR DIFFERENTES PARCELLES DE JACHERE SUR L'ALTIPLANO BOLIVIEN

Résumé

Sur l'Altiplano bolivien, l'agriculture est caractérisée par des risques très élevés de sécheresse et de gelées. Face à ces limitations, la date du semis et le contenu en eau du sol pour les premières phases de développement de la culture seront déterminants pour le rendement. Pour aider à identifier des recommandations techniques qui servent à améliorer l'utilisation de l'eau du sol par les plantes, on a analysé, dans ce travail, l'évolution du bilan hydrique pendant la période hivernale sèche dans différentes parcelles en jachère et après la récolte.

Différentes composantes du bilan hydrique d'avril à octobre 1987 ont été analysées à partir de mesures neutrones et tensiométriques. Les résultats obtenus soulignent la faible variation de l'eau stockée dans le sol, due à une évaporation et à une évapotranspiration très réduites (inférieures à 1 mm/jour), même dans le cas où la jachère est couverte de végétation. Les différences observées à la fin de la période de pluies, dans le contenu de l'eau du sol entre les différentes parcelles, restent les mêmes

jusqu'au semis, après la période hivernale. Afin d'améliorer les conditions hydriques dans le sol pour la culture, il semble plus opportun d'étudier les possibilités d'augmentation du stockage de l'eau pendant la période de pluies -avec différentes dates et différents types de labours-, que de chercher à réduire les pertes pendant la période sèche hivernale.

THE EVOLUTION OF THE WINTER WATER BALANCE IN FALLOW PLOTS ON THE BOLIVIAN ALTIPLANO

Abstract

The Bolivian Altiplano agriculture is characterized by the ever prevalent risks of drought and frost. Faced with such limitations, the date of sowing and the soil moisture content in early stages of crop development are crucial in determine the final yield. The work presented analyses the evolution of the water balance over the dry winter period for both fallow and recently harvested plots in order to identify technical recommendations which might help improving the use of soil moisture by plants.

Using tensiometers and neutronic measures we made an analysis of the different soil water balance components from April to October, 1987. The results obtained outline the low variability in the amount of water stored in the soil, a fact linked to the low values of evaporation and evapotranspiration (less than 1 mm/day), even in cases where the fallow land is covered by vegetation. The differences observed in the soil moisture content between various plots remain constant from the end of the rainy season to the sowing period at the end of the winter period. In order to improve the hydraulic properties of the soil with the aim of increasing crop yield, it would seem more opportune to study ways of increasing the amount of water infiltrated into the soil during the rainy season (various labor methods and dates), than attempt to reduce soil moisture loss during the dry winter period.

INTRODUCCION

El altiplano boliviano se caracteriza por tener riesgos climáticos muy altos para la agricultura. Las precipitaciones son escasas e irregulares (Vacher e Imaña, 1989) y las heladas son frecuentes durante la estación de cultivo, en particular durante las últimas fases del desarrollo de la planta (Le Tacon et al., 1992). Ante estas fuertes limitaciones, la fecha de la siembra y el desarrollo de las plantas durante las primeras etapas del crecimiento son factores determinantes en el rendimiento del cultivo (Atteia et al., 1988). Las prácticas de la siembra, en el campo se realizan al inicio del período de lluvias, con escasas e irregulares precipitaciones. El agua en el suelo, en esta etapa, dependerá sobre todo del agua acumulada durante la época de lluvias, de su dinámica durante el invierno y de las primeras precipitaciones de la temporada de lluvia, precipitaciones que son generalmente escasas. Las labranzas del descanso que preceden la siembra de papa (cabeza de rotación) se efectúan, generalmente, al final de la estación de lluvias.

Actualmente, con la introducción del tractor, esta práctica está cambiando, y se realiza, en muchos casos, antes de la siembra. La recomendación de una fecha y de un tipo de labranza del descanso para un mejor almacenamiento del agua en el suelo, así como la introducción de técnicas para disminuir la evaporación durante la época invernal seca, son actualmente temas de discusión.

Para promover el debate sobre algunos aspectos, hemos tratado, en este trabajo, de responder a las preguntas siguientes: ¿cuál es la importancia de la evaporación del suelo según los diferentes estados de superficie durante la época invernal seca?, y ¿cuál es la influencia de la labranza del barbecho, justo antes de la siembra de papa, sobre las reservas de agua en el suelo?

En este estudio, nos proponemos seguir, durante el largo período seco invernal, los componentes del balance hídrico en diferentes parcelas que corresponden a situaciones características del barbecho en el altiplano boliviano. Los resultados obtenidos nos permitirán analizar la evolución del agua en el suelo según las diferentes situaciones y orientar así las recomendaciones para aumentar las reservas hídricas para los cultivos. En el altiplano, como lo señaló Orsag (1989b), los estudios sobre las transferencias de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, son muy escasos.

MATERIALES Y METODOS

El estudio fue realizado en el centro experimental del Instituto Boliviano de Tecnología Nuclear (IBTEN) de Viacha, estación representativa del altiplano norte, situada a 20 km al sur de La Paz (Vacher e Imaña, 1989).

El clima de Viacha se caracteriza por una temperatura media anual de 8°C (máximo anual de 16,8°C y mínima anual de -0,7°C), precipitaciones medias anuales de 650 mm y riesgos de sequía y de heladas elevados (Le Tacon et al., 1992).

El período estudiado abarca los meses de abril a octubre de 1987 y corresponde a la estación seca invernal.

Las experimentaciones

El terreno de experimentación de Viacha se caracteriza por un tenor en materia orgánica y una capacidad de intercambio de cationes bajos. El suelo está compuesto por los cuatro horizontes siguientes (Orsag, 1989 a):

- de 0 a 20 cm, suelo limo-arcillo-arenoso;
- de 20 a 55 cm, arcilla más compacta en los 15 primeros centímetros, luego más limoso;
- de 55 a 80 cm, arcilla clara, con concreciones calcáreas;
- de 80 a 100 cm, suelo limo-arenoso ocre; y
- a más de 100 cm, arena y arcilla verde.

Durante estos meses, fueron estudiadas las cuatro situaciones de cultivos siguientes:

- una parcela con un descanso largo de 15 años, cubierta de un pasto muy claro (50% de cobertura vegetal).
- una parcela con un descanso largo de 15 años con suelo desnudo; situación representativa de una gran gama de parcelas muy degradadas y sin vegetación del altiplano.
- una parcela con un descanso largo de 15 años labrada a fines de marzo para la siembra de tubérculos en noviembre. Se trata de un descanso largo, idéntico a los

anteriores, labrado por un tractor provisto de un arado de discos (profundidad media de labranza: 20 cm).

- una parcela postcosecha: Es una parcela donde la cosecha de papa fue efectuada a fines de marzo, y que en octubre será sembrada con cereales. Para este último caso, disponemos de tres situaciones distintas, como resultado de una investigación anterior. Una parcela postcosecha de papa con riego y con una labranza a 15 cm; otra de papa a secano con una labranza a 15 cm; y una parcela postcosecha de papa, con una labranza a 35 cm. Los diferentes almacenamientos de agua en el suelo, relacionados con estas experimentaciones, nos permiten analizar diversas situaciones hídricas al inicio de la estación invernal seca.

Mediciones

Las precipitaciones y la evapotranspiración potencial (ETP) fueron medidas por medio de una estación meteorológica automática (Cimel, Francia), instalada en el sitio experimental. En cada parcela experimental, fueron instalados dos sitios de medición. En cada uno de ellos se instaló un tubo de acceso para sonda de neutrones, hasta una profundidad de 120 cm, y una batería de cuatro tensiómetros a 20, 40, 60 y 80 cm de profundidad.

La sonda de neutrones fue objeto de una calibración específica basándose en mediciones gravimétricas de muestras de suelos obtenidas en diferentes momentos de la campaña de medición. El estudio de la evolución del balance hídrico se basó en un análisis de la dinámica del almacenamiento de agua en el suelo y de la evaporación y evapotranspiración de las parcelas. Los stocks de agua en el suelo y los perfiles hídricos fueron estimados a partir de mediciones neutrónicas.

La ET y la ETR fueron calculadas a partir de la ecuación del balance hídrico siguiente:

$$ET \text{ o } ETR = P - \Delta S - D - R$$

Con:

ΔS = Variación del almacenamiento de agua estimada a partir de las medidas neutrónicas entre dos fechas

P = Precipitaciones

R = Escurrimiento, considerado nulo para esta experimentación

D = Drenaje

En total se disponía de 9 sitios de mediciones: 2 para el barbecho con praderas (VPS1 y VPS2); 2 para el barbecho con suelo desnudo (VS1 y VS2); 2 para el barbecho labrado (VL1 y VL2); 3 para las parcelas de postcosecha (V02 (riego), V15 (labranza a 15 cm), V35 (labranza a 35 cm)).

Las mediciones neutrónicas se efectuaron aproximadamente cada 15 días, por capas de 10 cm, y las mediciones tensiométricas se efectuaron cada día. Las mediciones del agua en el suelo en un momento dado pueden presentar imprecisiones, en cambio las variaciones de almacenamiento de agua entre dos fechas obtenidas por este método son bastante precisas (Daudet y Vachaud, 1977; Katerji et al., 1984).

RESULTADOS Y DISCUSION

Perfiles de carga

La batería de tensiómetros permite determinar el perfil del potencial total o carga hidráulica, $H(z)$ (Daudet y Vachaud, 1977). Según la generalizada ley de Darcy, durante un escurrimiento vertical, el flujo Yz a través de un nivel z está unido al gradiente de carga a este nivel por la relación:

$$Yz = -K(O) \frac{dH}{dz}$$

con $K(O)$: conductividad hidráulica del suelo.

Según esta expresión, se puede deducir que sí existe en el suelo, en un instante t , un nivel z_0 donde $H(z)$ presenta un máximo (por lo tanto $dH/dz = 0$); el flujo será nulo a este nivel, que separará una zona de escurrimiento ascendente ($z < z_0$) de una de escurrimiento descendente ($z > z_0$). Este nivel es llamado *plan de flujo nulo*.

En el caso de Viacha, se constata durante el período estudiado que los perfiles de carga muestran la existencia de un plan de flujo nulo, estable en el transcurso del tiempo, a una profundidad de 60 cm (Figura 1). En el suelo desnudo y en el suelo labrado, se puede estimar directamente la evaporación de las parcelas a partir de variaciones de almacenamiento en agua en la capa de suelo, 0-60, cm y de precipitaciones, sin tomar en cuenta un drenaje: se deduce

$$ET = P - \Delta S.$$

No obstante, en el caso del descanso de larga duración, las herbáceas que componen el pastizal tienen, probablemente, raíces más profundas que 60 cm. Por eso, hemos estudiado la capa de suelo entre 0 y 110 cm. La constancia de las mediciones a partir de 80 cm nos condujo a considerar un drenaje como nulo a 110 cm durante la estación seca estudiada.

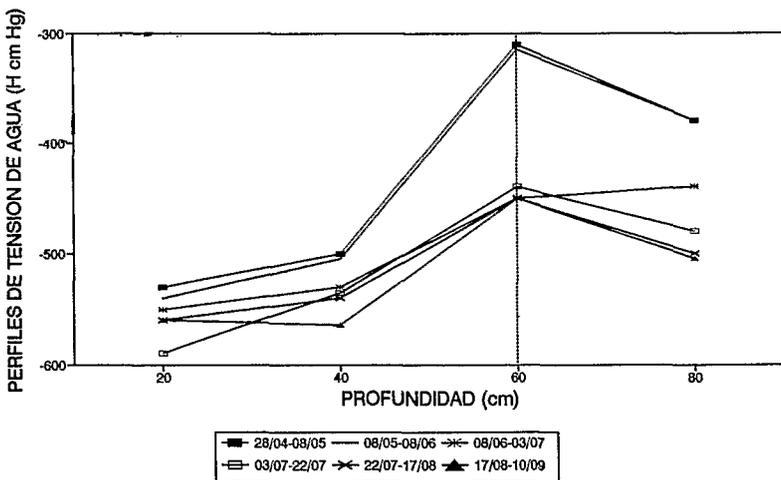


Figura 1. Perfiles de tensión de agua (Promedios para VS, VL, VO2, V15, V35)

Componentes del balance hídrico

Las precipitaciones de abril a septiembre fueron escasas, de acuerdo con las medias. Sin embargo, el mes de octubre fue bastante húmedo (Cuadro 1). Es necesario resaltar una nevada al inicio del mes de julio de 18,5 mm.

Cuadro 1. Precipitaciones durante el período seco invernal a Viacha (abril-octubre 1987)

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Total
1987	14	17	6,5	18,5	1,5	30	80,5	166,5
Promedio	38,4	15,6	3,9	6,3	15,2	33,4	35,7	148,5

Fuente: SENAMHL.

Los valores diarios de evaporación y de evapotranspiración fueron reportados en el Cuadro 2 y representados en las Figuras 2 y 3.

Cuadro 2. Evaporación y evapotranspiración diarias (abril-octubre 1987)

Fecha inicial	Fecha final	Precipitaciones (mm)	VO2 ET/día	V15 ET/día	V35 ET/día	VS1 ET/día	VS2 ET/día
13/04/87	22/04/87	12,0	1,4	1,9	2,2	1,4	1,3
22/04/87	08/05/87	2,5	0,4	0,6	0,4	0,3	0,2
08/05/87	08/06/87	14,5	0,7	0,7	0,5	0,6	0,7
08/06/87	22/07/87	25,0	0,5	0,3	0,3	0,4	0,5
22/07/87	17/08/87	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3
17/08/87	10/09/87	3,0	0,6	0,4	0,3	0,2	0,4
10/09/87	08/10/87	28,5	0,6	0,7	0,7	0,9	0,9
08/10/87	28/10/87	80,5	2,9	2,5	3,1	3,3	3,0
Promedio	ETR/día		0,9	0,9	1,0	0,9	0,9

Fecha inicial	Fecha final	Precipitaciones (mm)	VL1 ET/día	VL2 ET/día	VPS1* ET/día	VPS2* ET/día
12/04/87	22/04/87	12,5	1,2	1,1	1,9	1,4
22/04/87	28/04/87	0,0	0,2	0,1	0,3	0,3
28/04/87	08/05/87	2,5	0,1	0,2	0,2	0,2
08/05/87	08/06/87	14,5	0,5	0,5	0,6	0,5
08/06/87	03/07/87	25,0	0,3	0,5	0,1	0,1
08/07/87	22/07/87	0,0	0,2	0,1	0,1	0,3
22/07/87	17/08/87	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3
17/08/87	10/09/87	3,0	0,6	0,3	1,2	0,3
10/09/87	08/10/87	28,5	0,7	0,8	2,5	0,7
08/10/87	28/10/87	80,5	2,7	3,1	0,7	2,3
Promedio	ETR/día		0,7	0,7		0,6

* Balance hídrico de 0 a 120 cm.

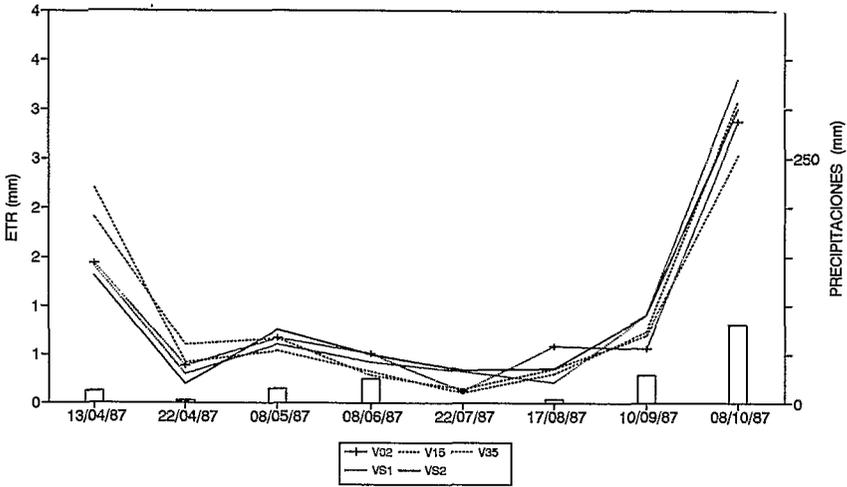


Figura 2. Evolución de ETR y ET (abril-octubre 1987)
(V02, V15, V35, VS1, VS2)

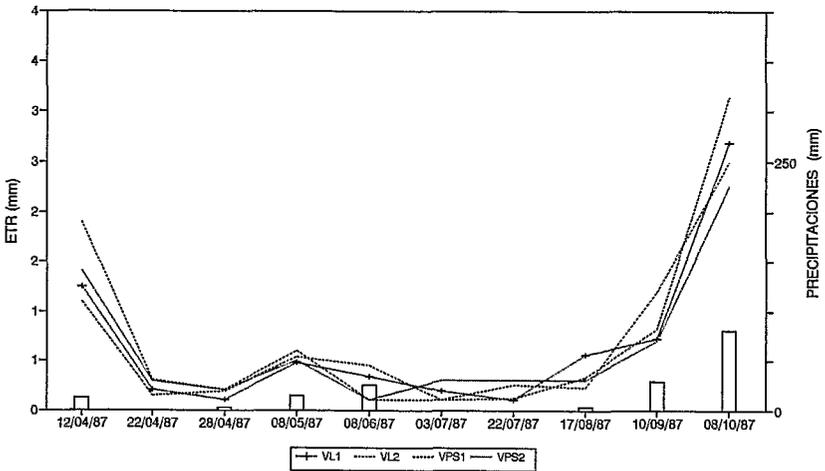


Figura 3. Evolución de ETR y ET (abril-octubre 1987)
(VL1, VL2, VPS1, VPS2)

Los resultados indican, en general, valores muy bajos de ET y ETR durante el invierno; son inferiores a 1 mm/día en promedio, con una ETP de 2,3 a 3,5 mm por día. Estos resultados están corroborados por los estudios realizados por Orsag (1989a y 1993) en el mismo sitio experimental.

Los valores medios de la evaporación son de 0,9 a 1 mm/día en las parcelas post-cosecha, de 0,9 mm/día en el barbecho con suelo desnudo, de 0,7 mm/día en el descanso labrado y de 0,6 y 0,7 mm/día en los pastizales. En este último caso, la ETR durante el

invierno es muy baja. La actividad de los pastizales es reducida, e incluso nula durante este período (el coeficiente de cultivo, K_c , es del orden de 0,3). Estos valores tan bajos deben estar relacionados con las bajas temperaturas mínimas durante este período ($< -6^{\circ}\text{C}$ de promedio entre abril y septiembre).

En todos los casos, la ET y la ETR presentan valores máximos al final y al principio de la estación de lluvias, de acuerdo con las precipitaciones. La influencia de las precipitaciones invernales sobre la ET y la ETR, en el marco de nuestros intervalos de medición, es poco significativa.

El análisis de la evolución de los balances hídricos en los diferentes casos permite realizar las siguientes observaciones (Figuras 4 y 5):

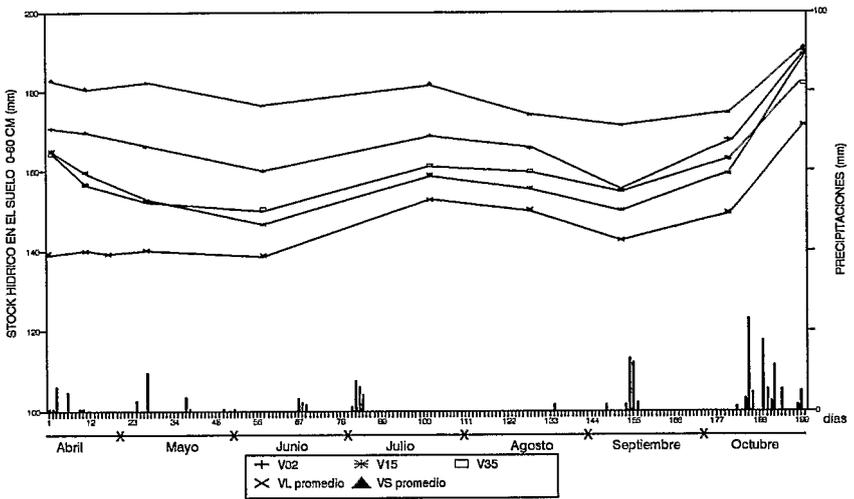


Figura 4. Balances hídricos comparados (Viacha, abril-octubre 1987)

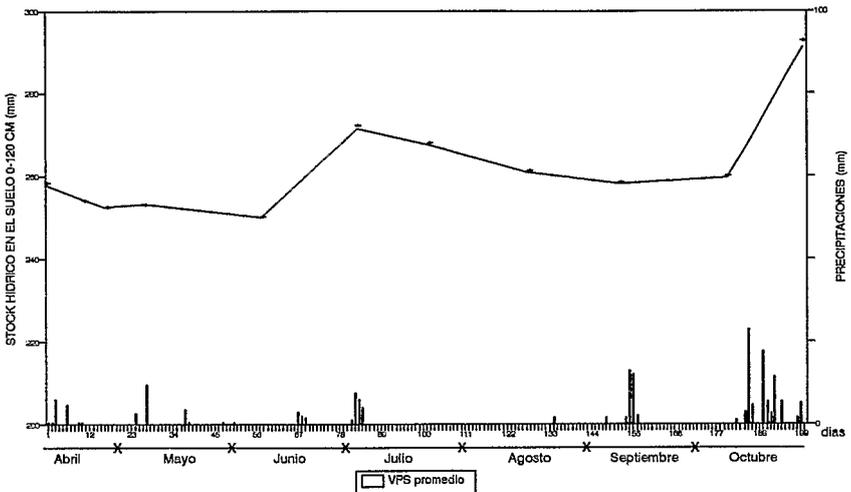


Figura 5. Balance hídrico VPS promedio (Viacha, abril-octubre 1987)

- las diferencias de almacenamiento de agua, observadas entre las diferentes parcelas en abril, perduran hasta las primeras lluvias de octubre;
- las variaciones máximas durante la estación seca (abril a septiembre) son inferiores a 15-20 mm, en todos los casos;
- sólo la caída de nieve (18,5 mm) a principios de julio provocó un aumento sensible del almacenamiento en agua en el suelo en todas las parcelas.

La evolución de los perfiles hídricos está representada en las Figuras 6 a 11. Considerando la similitud de los perfiles hídricos de los dos sitios de medición en cada parcela, presentamos aquí solamente las figuras que corresponden a un sitio (VL1, VS1, V02, V15, V35 y VPS).

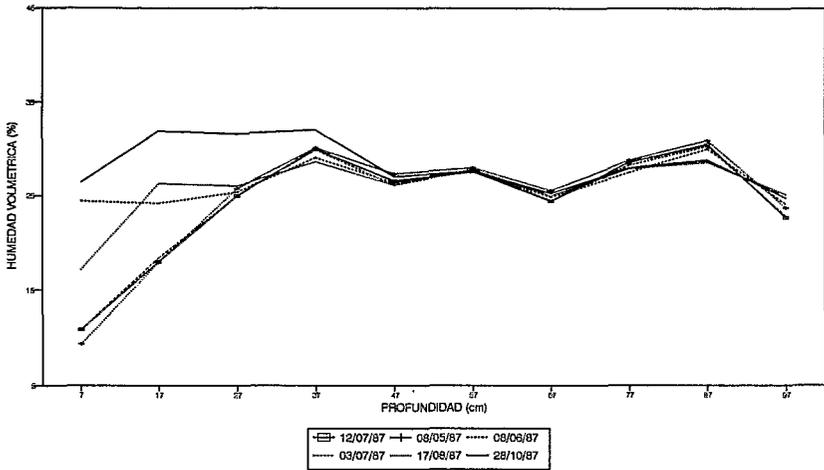


Figura 6. Perfil hídrico VL1 (Viacha, abril-octubre 1987)

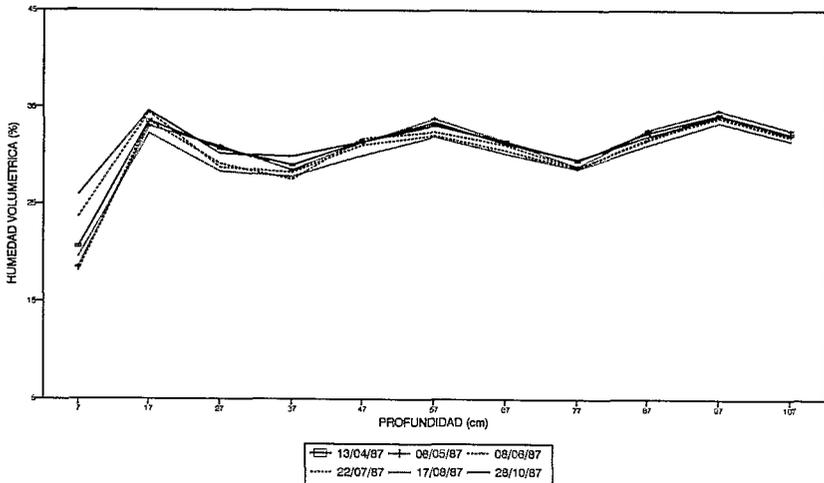


Figura 7. Perfil hídrico VS1 (Viacha, abril-octubre 1987)

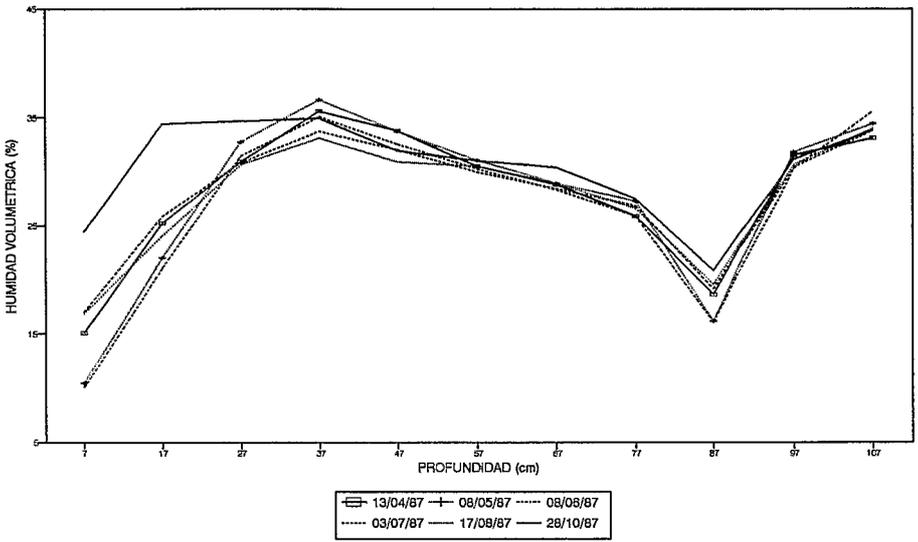


Figura 8. Perfil hídrico VO2 (Viacha, abril-octubre 1987)

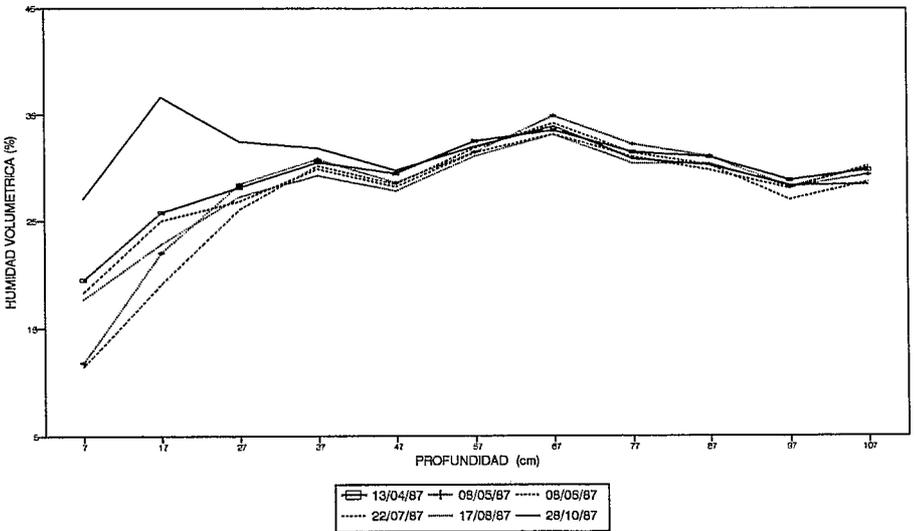


Figura 9. Perfil hídrico V15 (Viacha, abril-octubre 1987)

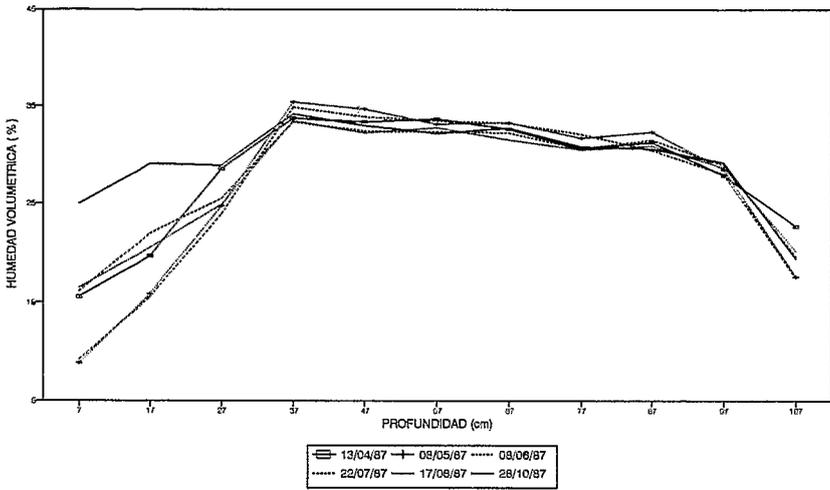


Figura 10. Perfil hídrico V35 (Viacha, abril-octubre 1987)

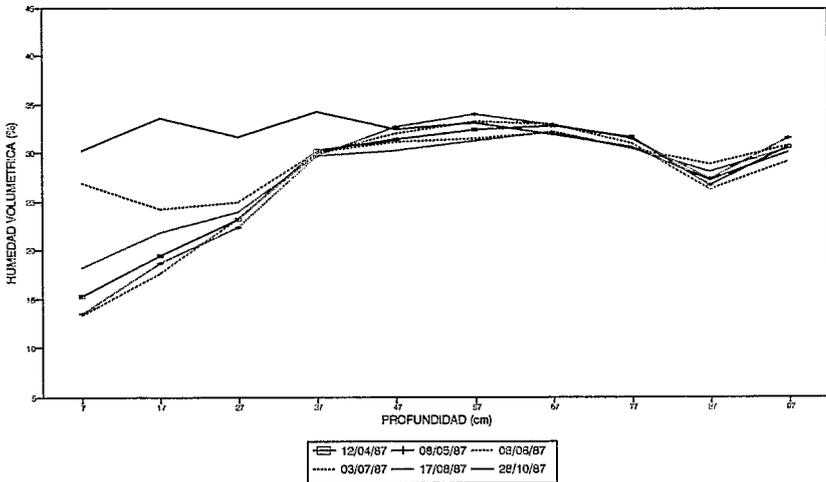


Figura 11. Perfil hídrico VPS2 (Viacha, abril-octubre 1987)

Según el análisis de estas figuras, se constata que las variaciones del almacenamiento de agua en el suelo se producen solamente en los primeros 35 cm y con una variación muy baja durante toda la estación invernal.

Se observa un almacenamiento de agua mínimo en junio, con un llenado reducido en julio, después de la nieve, que no supera los 30 primeros cm, seguido luego de una muy lenta disminución hasta el llenado importante en octubre,

relacionado con las fuertes lluvias de primavera, con una penetración del agua hasta los primeros 50 cm.

En las parcelas, se observa el nivel constante de humedad en el suelo a partir de 40 cm. Los resultados obtenidos nos demuestran que las pérdidas de agua en el suelo durante el invierno son muy inferiores a 1. mm/día y conciernen solamente a los primeros horizontes del suelo. Esto se puede relacionar con el efecto *self-mulching* de los primeros horizontes del suelo y con la existencia de una capa arcillosa compacta a partir de 25 cm. La capa de superficie tiende a pulverizarse durante la estación seca invernal y puede formar así un *self-mulching* que disminuye la evaporación (Hillel, 1972). El efecto barrera en la evaporación invernal del horizonte arcilloso compacto ya fue descrito por Orsag (1989a).

Con respecto al barbecho con pastizales, es necesario subrayar la virtual ausencia de actividad de transpiración, por efecto, sin duda, de la influencia de las temperaturas mínimas muy bajas durante la estación invernal.

Por otro lado, podemos observar el efecto durable de la caída de nieve sobre el agua en los primeros horizontes del suelo, en concordancia con la experiencia de los campesinos del altiplano. Estos constatan que la nieve se traduce en un aumento durable del agua en el suelo, a diferencia de la lluvia. La nieve corresponde a los meses más fríos y a las ETP más bajas con un albedo muy alto.

Las diferencias observadas en los almacenamientos de agua iniciales se conservan idénticas al terminar el invierno. Esto se relaciona con las bajas ET y ETR. El agua almacenada en el suelo al final de la estación seca depende, sobre todo, del agua almacenada al final de la estación de lluvias. Estos resultados inducen a orientar las nuevas experiencias hacia un almacenamiento acrecentado de agua en el suelo durante la época húmeda. Los primeros resultados obtenidos por diferentes fechas de labranza del descanso van en este sentido (Orsag, 1989c).

Las variaciones del agua en el suelo durante el invierno para el barbecho labrado, al final de la lluvia, y el barbecho que será labrado al inicio de la época de lluvia, indican que la labranza de primavera no tiene mucha influencia sobre las reservas hídricas del suelo. No obstante, esta opción es arriesgada, pues se debe esperar fuertes precipitaciones para labrar; además, la labranza del mes de marzo debe traducirse en un efecto muy benéfico sobre la estructura del suelo.

CONCLUSION

La evolución del balance hídrico durante el invierno seco subraya la reducida pérdida de agua del suelo en diferentes parcelas de descanso y de los pastizales durante esta estación. La evaporación y la evapotranspiración durante el período invernal son muy bajas aún en el caso de una pradera.

Los resultados obtenidos con *mulch* de paja y con arado (Orsag, 1993) no muestran, a nuestro juicio, una mejor conservación del agua en el suelo. Con el fin de mejorar las condiciones hídricas para el cultivo, al inicio de su crecimiento, parece más oportuno estudiar las posibilidades de aumento del almacenamiento del agua en el suelo con diferentes fechas y diferentes tipos de labranza del descanso durante la época de lluvia, técnicas que deben ser adaptadas a las condiciones campesinas.

LITERATURA CITADA

- ATTEIA O., VACHER J.J., ELDIN M., 1988. *Analyse des risques de sécheresse sur l'altiplano bolivien à partir d'un modèle simple de bilan hydrique*. Informe ORSTOM-SENAMHI, La Paz, Bolivia, 10 pp.
- DAUDET F.A., VACHAUD G., 1977. *La mesure neutronique du stock d'eau du sol et ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique*. Agronomie, 28 (5): 503-519.
- HILLEL D., 1972. *Soil and Water Physical, Principles and Processes*. Academic Press. New York. USA. 288 pp.
- KATERJI N., DAUDET F., VALANCOGNE Ch., 1984. *Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures. Détermination et importance*. Agronomie, 4: 779-787.
- LE TACON Ph., VACHER J.J., ELDIN M., IMAÑA E., 1992. *Los riesgos de heladas en el altiplano boliviano, en: Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos*. ORSTOM-IBTA-CIID: 287-291.
- ORSAG V., 1993. *Estudio preliminar de la protección del suelo y su influencia sobre la reducción de pérdidas de agua por evaporación de un suelo franco-arcilloso del altiplano central*. Jilñañani 1 (1). Facultad de Agronomía, UMSA, La Paz, Bolivia: 3-9.
- ORSAG V., 1989 a. *Determinación de las fluctuaciones de almacenamiento de agua en un aridisol del altiplano central con ayuda de técnicas nucleares*. Ecología en Bolivia, 13: 1-10.
- ORSAG V., 1989 b. *Características del régimen aéreo de un aridisol en el altiplano central de Bolivia*. Ecología en Bolivia, 13: 11-22.
- ORSAG V. 1989 c. *Efecto del manejo agrícola alternativo de un aridisol del altiplano central de Bolivia sobre el almacenamiento de agua en el suelo*. Ecología en Bolivia, 13: 23-32.
- VACHER J.J., IMAÑA E., 1989. *Los riesgos de sequía y de heladas en el altiplano boliviano*. Informe ORSTOM-SENAMHI: 30 pp.