



**FACULTAD DE AGRONOMIA
1907 – 100 años – 2007**

SEMINARIO DE DISCUSIÓN TÉCNICA

**Importancia del agua en el
actual escenario agrícola.
Posibilidades de aplicación
de riego suplementario**

VIERNES 27 DE JULIO DE 2007

**Unidad de Difusión
Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni"
Universidad de la República**

Ruta 3 km 363 - PAYSANDU

Tel. 598 720 2250 - 598 720 2259 Telefax: 598 72 27950/41282

Correo electrónico: eemac@fagro.edu.uy - web: www.fagro.edu.uy/eemac/web



SEMINARIO DE DISCUSIÓN TÉCNICA

VIERNES 27 DE JULIO DE 2007

Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni"

Ruta Gral. Artigas (3) km. 363

**"Importancia del agua en el actual escenario agrícola.
Posibilidades de aplicación de riego suplementario"**

PROGRAMA DE ACTIVIDADES

Hora 8.30 - Inicio

Hora 9.00 - DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN CULTIVOS DE VERANO EN EL LITORAL

Ing. Agr. Luis Giménez (FAC. AGRONOMÍA)

Hora 9.30 - FUENTES DE AGUA PARA RIEGO SUPLEMENTARIO. REPRESAMIENTOS DE AGUAS DE ESCORRENTIA. *Ing. José Luis Genta e Ing. Nicolás Failache (M.V.O.T.M.A.)*

Hora 10.00 - RIEGO POR ASPERSIÓN *Ing. Agr. Gabriel Baccino (CONSULTOR)*

Hora 10.30 - Café

Hora 11.00 - RIEGO POR SUPERFICIE *Ing. Agr. Mario García Petillo (FAC. AGRONOMÍA)*

Hora 11.30 - ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RIEGO SUPLEMENTARIO - COSTOS

Ing. Agr. Guillermo Cardellino (CONSULTOR)

Hora 12.00 - Almuerzo

Hora 13.30 - RESPUESTA AL RIEGO EN PASTURAS

Ing. Agr. Carlos Mas e Ing. Agr. Francisco Formoso (INIA)

Hora 14.00 - RIEGO SUPLEMENTARIO EN MAÍZ, SORGO Y PASTURAS EXPERIENCIA COMERCIAL

Ing. Agr. Bernardo Böcking (CONSULTOR)

Hora 14.30 - Café

Hora 15.00 - EL RIEGO EXTENSIVO DESDE LA PERSPECTIVA ESTATAL

Ing. Agr. Fernando Olmos

(DIRECTOR PROGRAMA RECURSOS NATURALES RENOVABLES. M.G.A.P.)

**Hora 15.30 - ¿QUÉ FALTA INVESTIGAR EN RIEGO EXTENSIVO? TRABAJOS EN MARCHA
FACULTAD DE AGRONOMÍA - INIA**

Hora 16.00 - PROPUESTAS PARA AVANZAR EN RIEGO EXTENSIVO DEL LITORAL

DISCUSIÓN GENERAL

Hora 17.00 - Finalización

(Nota: Participarán autoridades del M.G.A.P.)



E.E.M.A.C.

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA - FACULTAD DE AGRONOMÍA

Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni"

Tel fax: 598 72 27950-41282 - 598 720 2259-2250

Ruta 3 Gral. Artigas km 363 - PAYSANDU-URUGUAY

Correo electrónico: eemac@fagro.edu.uy Página Web: www.fagro.edu.uy/eemac/web

Sistemas de Producción Sensibles a la Variabilidad Climática

Cosecha y Uso del Agua

Fernando Olmos
Recursos Naturales Renovables
MGAP
folmos@mgap.gub.uy

1 – ecosistema / sistema de producción / modelo

Los sistemas de producción en Uruguay, al igual que en otras regiones, están basados en las posibilidades y potencialidades de los ecosistemas naturales. La estructura de estos ecosistemas puede simplificarse en algunos componentes básicos con sus particularidades asociadas a cada región, caracterizada por los valores que toman cada uno de los parámetros usados para su caracterización (Figura 1).

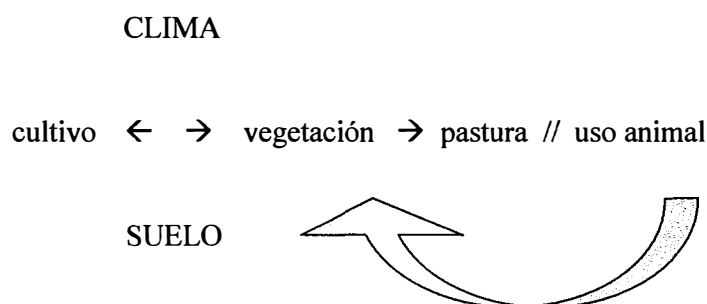


Figura 1 – Componentes del ecosistema Campos

La productividad animal está directamente relacionada con la productividad primaria de la pastura, la cual depende de la historia previa de manejo de cada comunidad vegetal, el tipo de suelo y el clima.

Las decisiones sobre los sistemas productivos implantados en cada ecosistema son tomadas por los productores y constituyen lo que podemos denominar las Unidades Ecológicas de Manejo, UEM. Por ejemplo en la Unidad de Suelo Cuchilla de Caraguatá se identifican básicamente seis sistemas de producción (Figura 2).

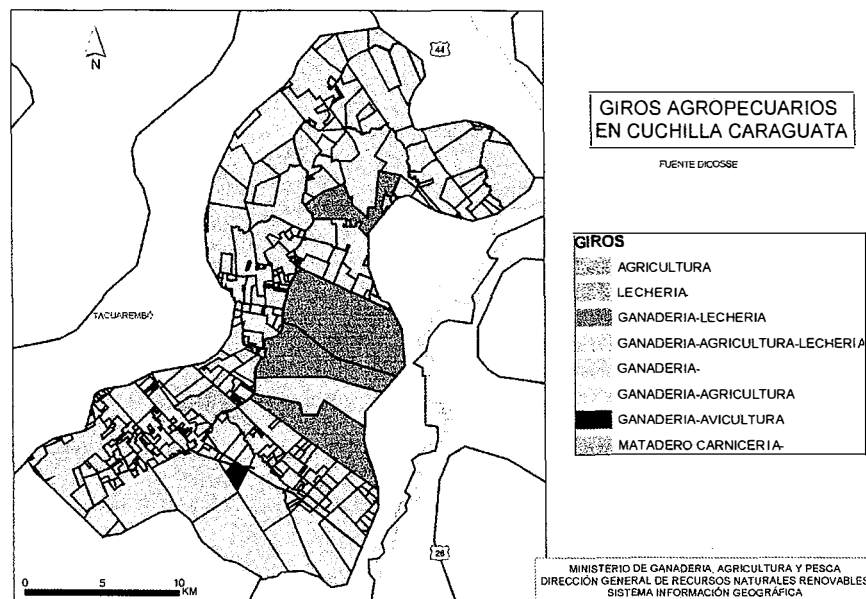


Figura 2 - Unidades Ecológicas de Manejo (UEM) en la Unidad de Suelos Cuchilla de Caraguatá

Estas unidades ecológicas presentan diferentes tamaños independientemente del sistema de producción, generando un uso diferente de los recursos naturales, flora, fauna, suelo y agua (Figura 3).

Unidades Ecológicas de Manejo por estrato de tamaño				
estrato en hectáreas	número de predios	hectáreas	número acumulado	has. acumuladas
< 50	81	1.503	81	1.503
50 – 100	30	1.970	111	3.473
100 – 200	21	3.062	132	6.535
200 – 500	24	7.404	156	13.939
500 – 1.000	14	10.735	170	24.674
1.000 - 2.500	6	7.131	176	31.805
> 2.500	2	7.607	178	39.412
		39.412		

Figura 3 – Número de UEM según el tamaño de los predios

De los componentes básicos del ecosistema, la variabilidad climática anual, el tipo de suelo y el manejo del pastoreo son los factores que más inciden en la variación de la productividad predial (Rosengurtt, 1943; Carámbula, 1978; Castro, 1979; Formoso y Allegri, 1984; Olmos, Corsi y Améndola, 1983; Olmos 1987a, b; Olmos, 1990; Olmos et al., 2005) y en menor medida la aplicación de altos niveles de fertilizantes químicos (NP) (Berretta, 2005; Boggiano et al., 2005).

2- impactos de la variabilidad climática en los sistemas de producción

a- funcionamiento básico

- intercepción de la radiación solar
- extracción de nutrientes
- uso del agua

son los factores básicos que condicionan la productividad primaria (cultivos y pasturas) y por lo tanto la productividad secundaria (animal) en un ecosistema dado; en este contexto, la época de siembra, la densidad de plantas, el nivel de fertilización, la elección de la especie y la variedad (aspectos genéticos) así como la secuencia de cultivos y el sistema de rotaciones constituyen elementos de manejo para la toma de decisiones; también lo constituyen el riego y el sistema de riego, el manejo del pastoreo del campo natural.

b- ejemplos de respuestas específicas de los componentes del sistema

-pasturas naturales

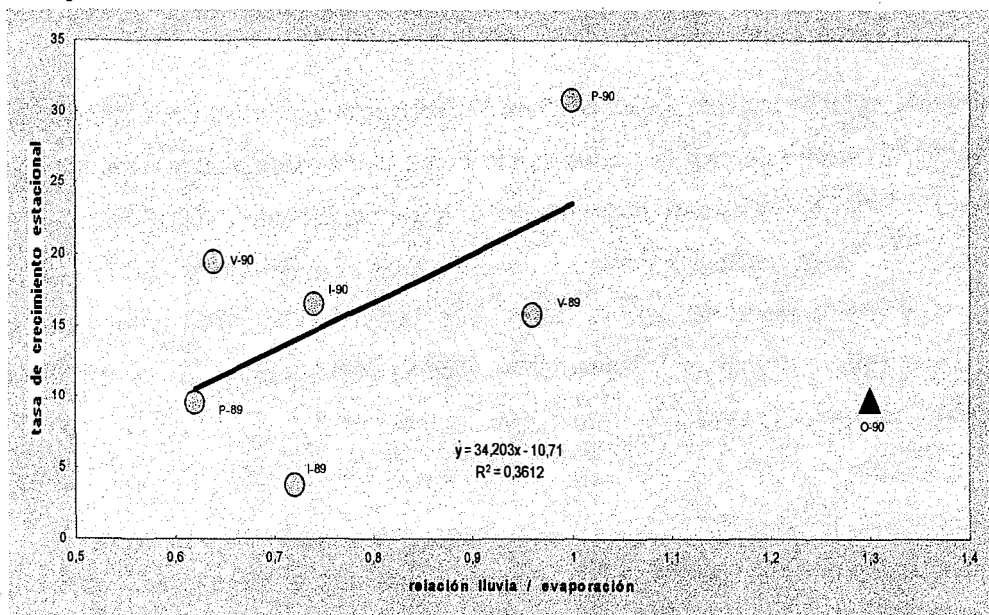


Figura 4 – Crecimiento en pasturas naturales según la relación lluvia / evaporación

En la medida que la relación lluvia / evaporación se acerca a 1 la tasa de crecimiento estacional del campo natural tiende a incrementarse.

- % de parición en ganadería extensiva

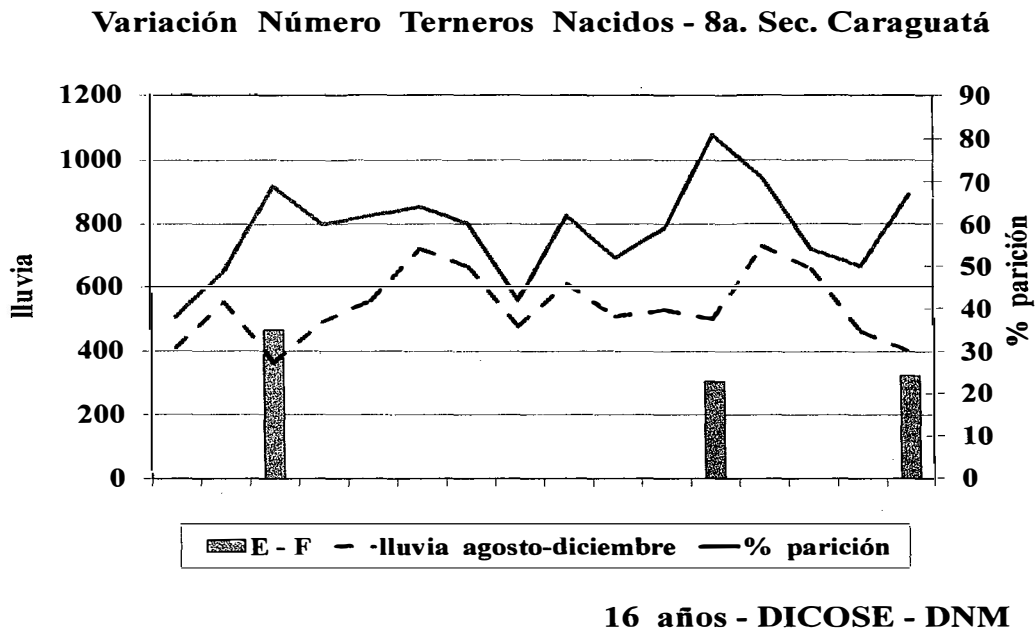


Figura 5 - Variación en el porcentaje de parición de vacunos y lluvias en el período agosto-diciembre (líneas); lluvias en enero-febrero (barras) en Caraguatá, Tacuarembó

Esta variabilidad es mayormente explicada por la variación en las lluvias primaverales (agosto-diciembre); siendo que los tres años donde existe cierta discrepancia en la tendencia son explicados ($>$ % parición) con la presencia de veranos húmedos complementando la relativamente baja lluvia registrada en la primavera previa. La primavera, en los campos naturales, es responsable por el 40 – 45 % del total de forraje producido en todo el año y la producción de forraje es claramente dependiente, además de la temperatura y la radiación solar, del balance hídrico en el suelo.

- balance forrajero en un brunosol

Si se considera el valor 1 el requerimiento de una vaca adulta, se observa en la Figura 6 que en la medida que nos desplazamos hacia el período verano-otoño el déficit forrajero es mayor.

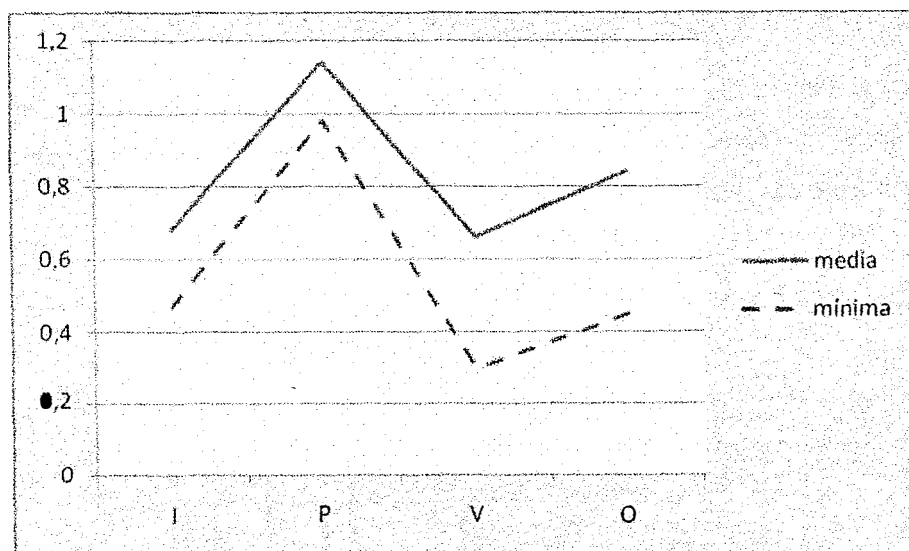


Figura 6 – Balance forrajera para una vaca adulta según la producción de forraje promedio y mínima en pasturas naturales sobre brunosoles en la región noreste

Desde el punto de vista de la producción animal, tanto el período invernal por la restricción al crecimiento de la pastura debida a las bajas temperatura y menor radiación solar como la restricción estival por el déficit hídrico relativo son factores importantes en la determinación de la productividad predial (Cuadro 1).

estación	rango	máximo – mínimo	coeficiente variación
Invierno	520 – 1300	780	30.2
Primavera	1200 – 2300	1100	42.2
Verano	600 – 2200	1600	50.6
Otoño	520 - 2200	1680	55.9

Cuadro 1 – Rango en la producción de forraje (Kg MS ha⁻¹) estacional y coeficiente de variación.

- caracterización ambiental / macro componente del ecosistema
- variabilidad en las lluvias estivales

La Figura 7 muestra claramente la variabilidad de las lluvias de verano (enero-febrero) para un período de 70 años en Tacuarembó, indicando que no se puede determinar un patrón estable de comportamiento de las mismas.

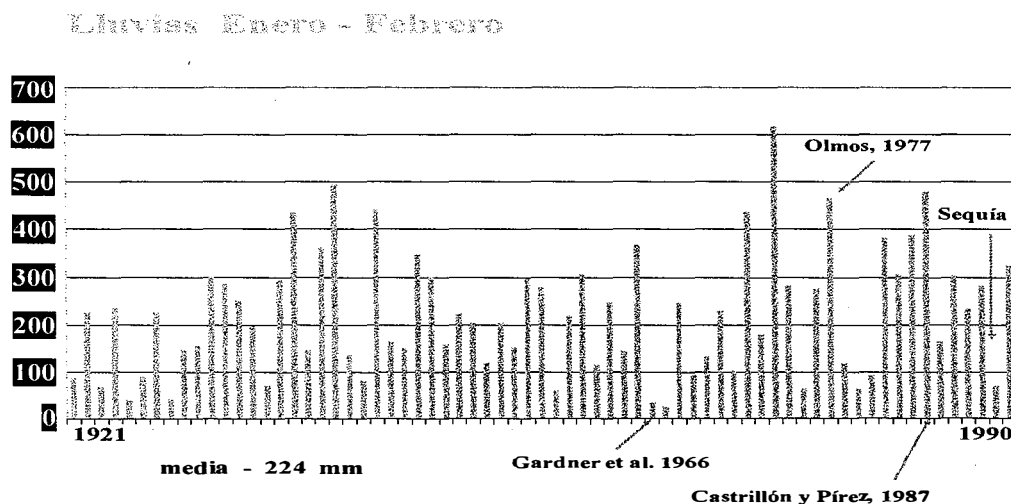


Figura 7 – Variación en la lluvia de verano en Tacuarembó en el período 1921 - 1990

La variabilidad en la lluvia en los ecosistemas naturales determina frecuentemente períodos de severos déficits hídricos que afectan la productividad de los sistemas de producción implementados en ellos. (Figura 8).

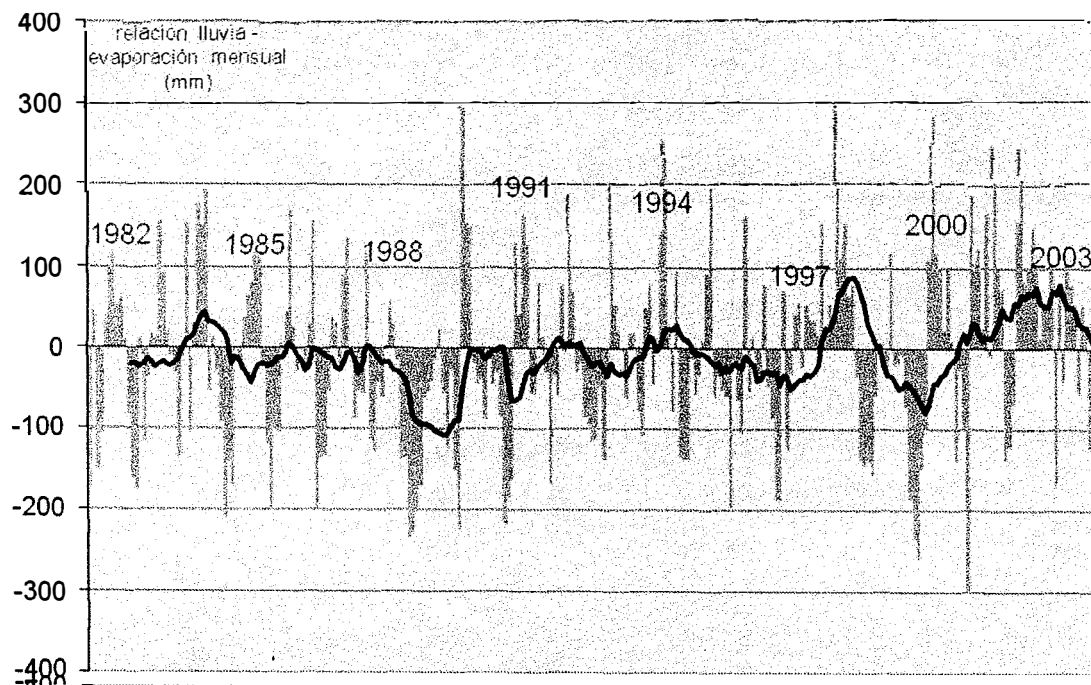


Figura 8 – Relación lluvia – evaporación Tanque “A” (barras) en Melo durante el período 1982 – 2003 y media móvil anual (línea continua)

- impacto agrícola

En general los cultivos de verano de secano se ven afectados por la deficiencia de agua en los suelos durante su ciclo de crecimiento, fundamentalmente si la misma ocurre en el período de llenado de grano. La soja y fuertemente el maíz, dependen para alcanzar rendimientos económicamente redituables, de las lluvias de verano (Figura 9). La variabilidad interanual de las lluvias afecta significativamente la posibilidad de instalar sistemas de rotación estables en el mediano plazo.

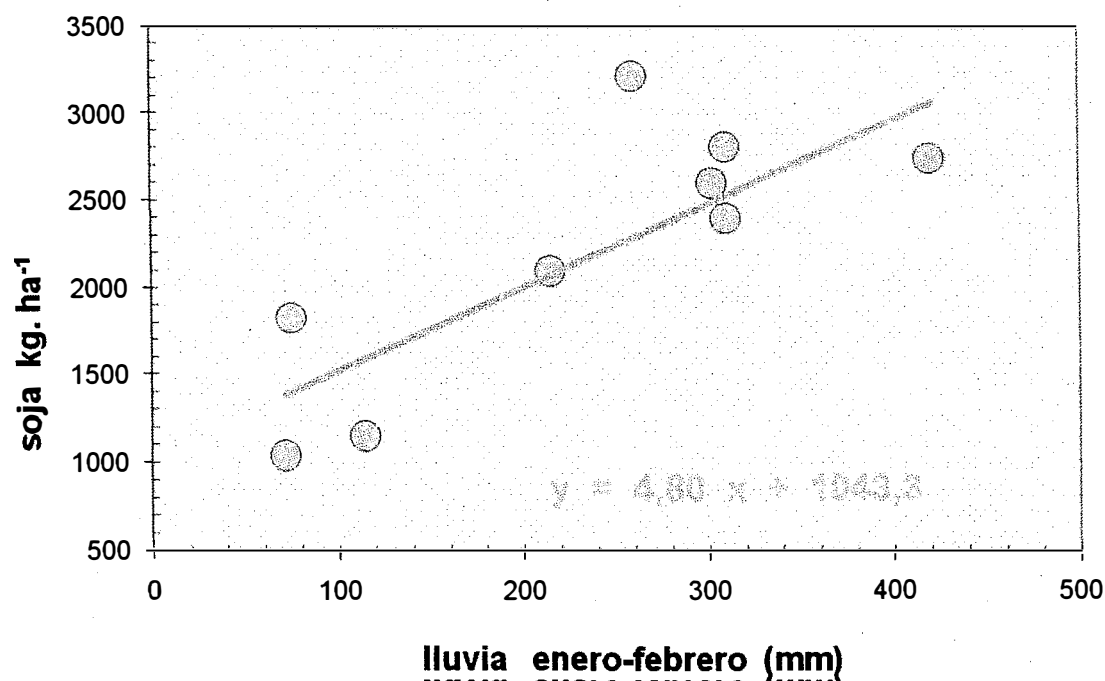


Figura 9 – Variación en el rendimiento de soja en la región noreste según las lluvias en enero-febrero

- horticultura – fruticultura

En cuanto a frutales cítricos algunos resultados indican que el riego afecta significativamente el rendimiento de frutos; en un promedio de seis años el rendimiento se incrementó 10 %, y en un año en particular 23 %; el riego, asimismo tuvo un efecto significativo en la distribución de calibres de las frutas (Proyecto No. 33, 1997).

Respecto al cultivo de cebolla se determinó un importante aumento en la producción total cuando se aplicó riego, variando a su vez la respuesta con el año del cultivo (Figura 10).

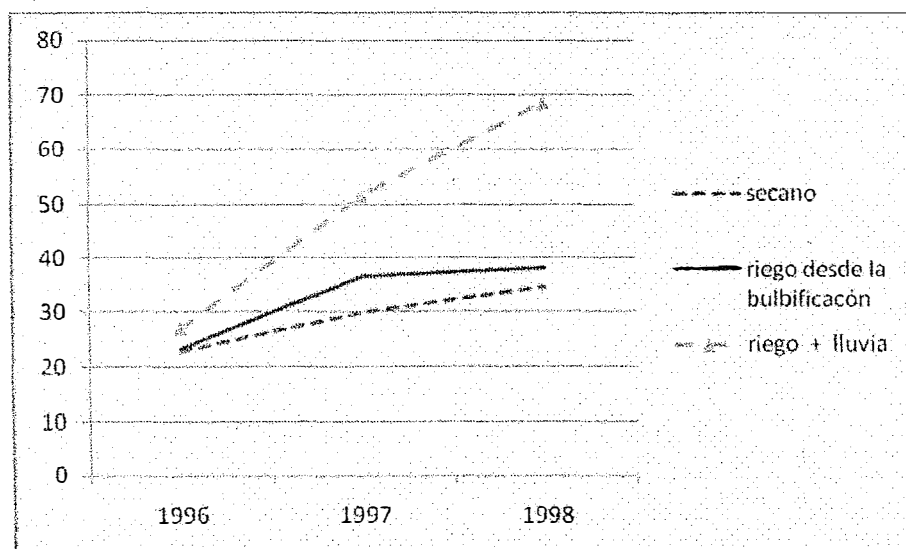


Figura 10 - Toneladas de cebolla / ha según el año de cultivo y el sistema de riego
(adaptado de C. García, 2005)

- pasturas artificiales leguminosas / gramíneas

Dado el origen de clima templado de las principales leguminosas utilizadas en las praderas artificiales las mismas se ven seriamente comprometidas en su productividad y persistencia luego de veranos con déficits hídricos; esta repuesta combinada con aspectos relacionados al manejo agronómico de las poblaciones introducidas en el ecosistema natural pueden conducir a la baja persistencia de las pasturas introducidas (Figuras 11 y 12). La relación lluvia / evaporación, igualmente permite caracterizar estaciones para comparar el crecimiento y proporción de especies forrajeras introducidas con diferencias en los requisitos para el crecimiento de cada una de ellas. La Figura 11 muestra la variación en la composición botánica de pasturas cultivadas que contenían tanto *T. repens* como *L. corniculatus*; con

valores más bajos de la relación (verano relativamente seco) predomina la presencia de lotus en el otoño siguiente, en cambio es mayor la presencia de *T. repens* en otoño cuando el verano ha sido relativamente húmedo (relación 0.81).

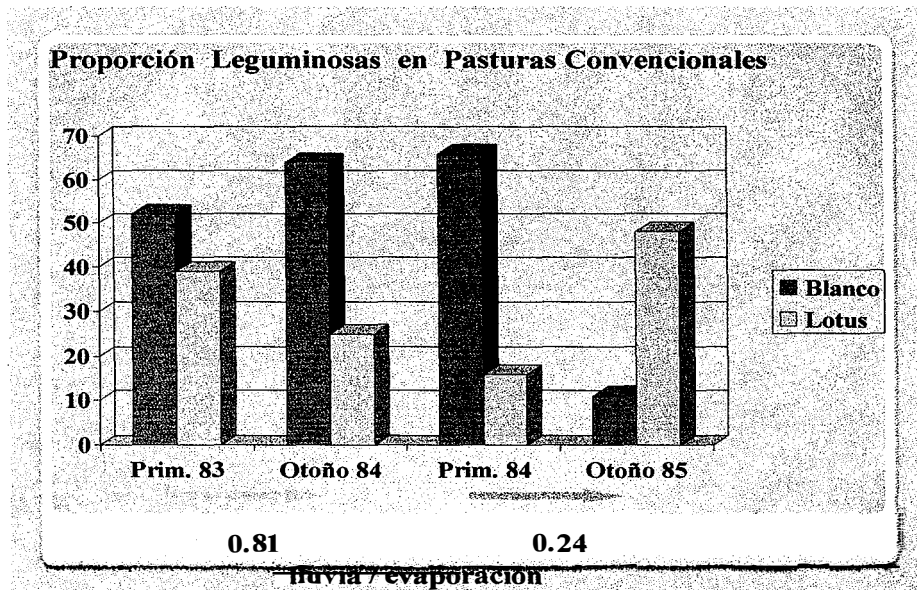


Figura 11 -Variación estacional en la proporción de trébol blanco y lotus según la relación lluvia / evaporación de verano.

Figura 12 – Fragmentación y simplificación de la estructura (1) de plantas de trébol blanco en una pastura de más de 20 años luego de un verano con déficit hídrico

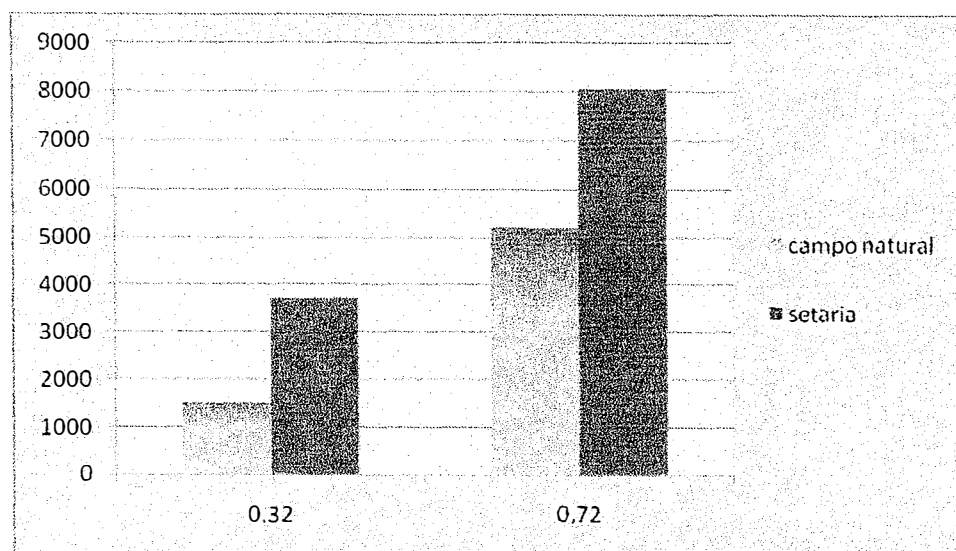
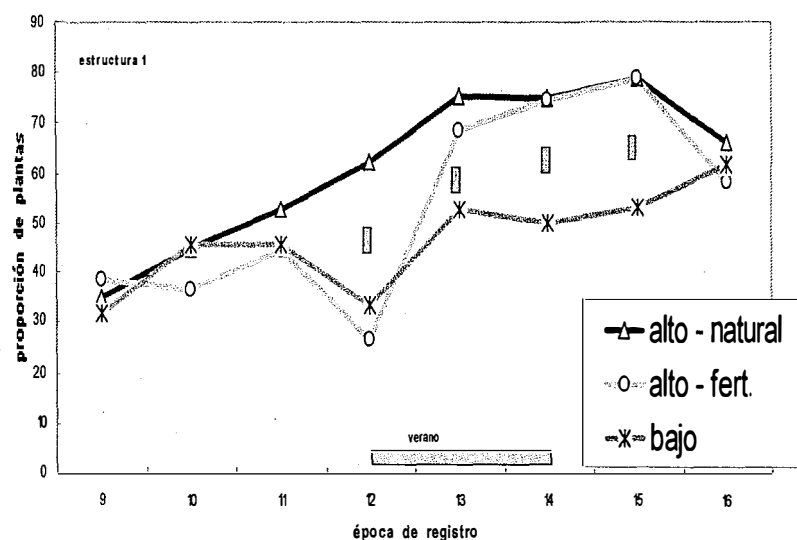


Figura 13 – Producción de una pastura natural (kg MS ha^{-1}) y de *Setaria anceps* sobre un brunosol en dos veranos, uno relativamente seco (0.32) y otro relativamente húmedo (0.72) según la relación lluvia / evaporación

La productividad de pasturas perennes (campo natural o setaria) fue significativamente mayor con un mejor balance hídrico en el suelo durante el verano, indicando al mismo tiempo el alto potencial de algunas especies adaptadas a suelos de la región noreste (Figura 13).

Se hace extremadamente importante el análisis de las respuestas específicas por componente del sistema de producción dentro del ecosistema natural. Entre diferentes aspectos deberían considerarse algunos tales como: ciclo vs. ambiente; fenología; biología de poblaciones; períodos críticos y sensibles al estrés hídrico; tipo de suelo, infiltración, pendiente, USLE; el uso de especies perennes vs. especies anuales; mejoramiento genético, selección; relación especie-hábitat (matriz); posibilidades de mejorar las predicciones climáticas a mediano plazo/costo; consideración de problemas y soluciones en diferentes escalas potrero-predio-cuenca, individual-colectiva; EIA para el mejor uso del agua, ejes biológico-económico-social, análisis integral.

El laboreo de verano, desarrollado para el cultivo de arroz, ha significado un cambio tecnológico vinculado precisamente a la adaptación de un sistema de producción al ecosistema natural; por su parte la ganadería extensiva al intensificarse y reducir la edad de faena se ve y verá enfrentada a los frecuentes períodos de estrés hídricos presentes en los ecosistemas naturales y deberá encontrar una solución tecnológica aplicada al sistema. La intensificación ganadera incrementa la sensibilidad de los sistemas a la variabilidad climática.

Las consideraciones necesarias para enfrentar los desafíos de incrementar la productividad y sustentabilidad de los sistemas productivos deberán ser, exhaustivas, cuantificadas y específicas a cada sistema propuesto.

3 – propuestas básicas

- identificación de limitantes productivas / severidad de la dependencia climática por sistema de producción / interacción con otras variables
- evaluación de costos asociados a la implementación del riego estratégico: fuente de agua – infraestructura – sistemas de riego y conducción – cosecha en cuencas
- evaluación de riesgos / beneficios desde los tres ejes: económico – biológico – social / EIA

- desarrollo tecnológico: técnicas de mejor uso del agua / accesibilidad a equipos adecuados a escala predial
- importancia de incrementar la investigación básica aplicada a los problemas a resolver (foco) en forma de equipo multidisciplinario (sistemas de producción)
- mejor uso de nuestros propios recursos naturales, por ejemplo:

1- Ganadería

llueven 900 – 1.300 mm año⁻¹

un animal necesita beber 22.000 litros por año

aproximadamente un animal necesita 2 de cada 1.000 litros que llueven al año

sin embargo frecuentemente tenemos períodos de estrés hídrico con

insuficiencia para la sobrevivencia animal

2- Pasturas:

-balance forrajero / necesidades del ganado – oferta de forraje

-acumulación estratégica de forraje CN / suplementación

-reserva 1er. curva de crecimiento de lotus en primavera

-identificación de áreas de pasturas para verano:

-fertilización CN

-fertilización y semillas CN

-cambio de vegetación con especies perennes

Por ejemplo la Unidad de Suelos Río Tacuarembó comprende 500.000 has. de suelos bajos hidromórficos de alto potencial productivo.

3- Desarrollo de cuencas con sistemas integrados como por ejemplo ganadería-arroz, considerando tanto los aspectos desde el punto de vista del productor arrocero, del productor ganadero y también del país: 2 años de cultivo – 4 años de pastura.

-una represa 120 has. puede servir para utilizar en rotación 900 has. adicionales de campo cosechando agua de una cuenca de 500 - 800 has ?

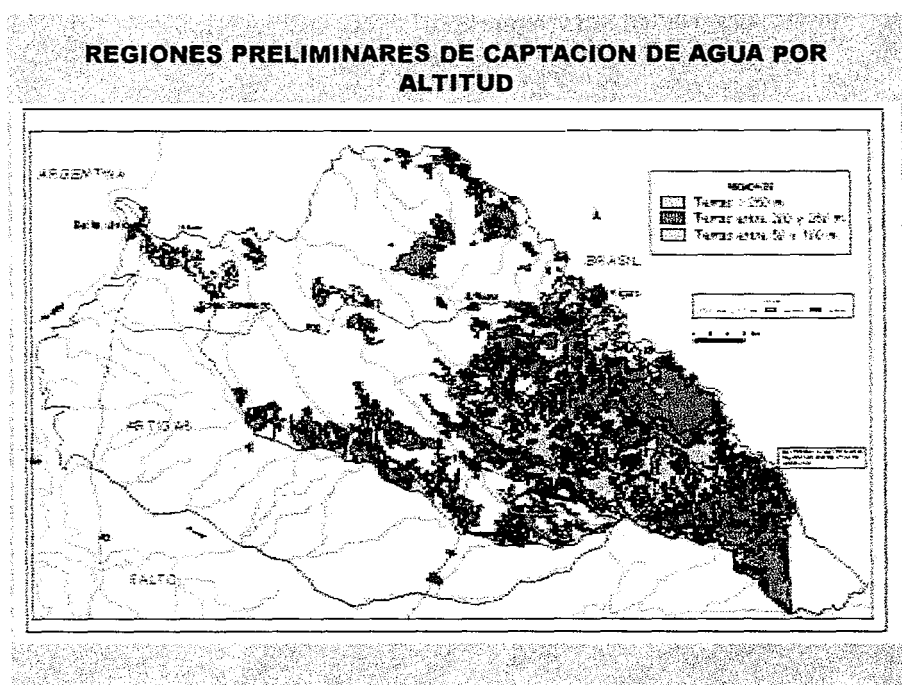
-un cultivo de arroz necesita en todo su ciclo 12.500 m^3 de agua ha^{-1} ; esta cantidad equivale a la lluvia promedio anual por hectárea.

4- Desarrollo de cuencas en forma integral:

Cebollatí – Olimar – Tacuarí – Tacuarembó – Cuareim

Estamos preparados ?





Bibliografía consultada

Berretta E. 2005 – Producción y manejo de la defoliación en campos naturales de basalto. In: Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. INIA. Serie Técnica No. 151. pp. 61-73.

Boggiano P., Zanoniani R. y Millot J. C. 2005 – Respuestas del campo natural a manejos con niveles crecientes de intervención. In: Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. INIA. Serie Técnica No. 151. pp. 105-113.

Carámbula M. 1978 – Avances en Pasturas IV. CIAAB-MAP.

Castro E. 1979 – Producción de pasturas en suelos arenosos. Jornada Ganadera. Est. Experimental del Norte. CIAAB-MAP.

Formoso F. y Allegri M. 1984 – Producción de pasturas. In: 1ra. Jornada agrícola-ganadera de Caraguatá. Est. Experimental del Norte. CIAAB-MAP.

García C. 2005 - Manejo del agua. In: Tecnología para la producción de cebolla .Bol. Div. INIA Las Brujas No. 88 p. 117-126

Olmos F. 1987a – La productividad de pasturas en relación a los principales parámetros del clima. In: Efectos climáticos sobre la productividad de pasturas en la región noreste. INIA Tacuarembó. Boletín Divulgación No. 64. pp. 1-12.

Olmos F. 1987b – Efecto del estrés hídrico estival en la composición botánica de pasturas convencionales. In: Efectos climáticos sobre la productividad de pasturas en la región noreste. INIA Tacuarembó. Boletín Divulgación No. 64. pp. 1-12.

Olmos F. 1990 – Productividad primaria en 10 comunidades naturales de la región noreste. In: 2do. Seminario Campo Natural. Ed. Hemisferio Sur. Tacuarembó.

Olmos F., Corsi W. y Améndola L. 1983 – Registros climáticos. Relaciones con el rendimiento de los cultivos. In: Reunión Técnica regional de cultivos. E. Experimental del Norte. CIAAB-MAP.

Olmos F., Franco J. y Sosa M. 2004 – Variación en la estructura de plantas de trébol blanco según el régimen de defoliación y la competencia del campo natural. In: Factores que afectan la persistencia y productividad de pasturas mejoradas con trébol blanco. INIA Tacuarembó. Serie Técnica No. 145. pp. 169-203.

Olmos F., Sosa M. y J. Franco 2005 – Impacto de las prácticas de manejo en la productividad y diversidad de pasturas naturales. In: Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. INIA. Serie Técnica No. 151. pp.93-103

Proyecto No. 33 – 1997 - Riego y fertilización en cítricos. Seminario Investigación Aplicada, PRENADER, Colonia, 1997.

Rosengurtt B. 1943 – Estudios sobre praderas naturales del Uruguay. 3ra. Contribución. Casa Barreiro y Ramos. Montevideo.

ESTUDIO DE LA DISPONIBILIDAD HIDRICA EN CULTIVOS DE VERANO EN EL LITORAL

Luis Giménez¹

INTRODUCCION

La agricultura de secano en el Litoral del país se desarrolló, en base a cultivos de invierno y con una elevada preponderancia del trigo y con participación menor de los cultivos de verano.

A partir del año 2002, el incremento en los precios internacionales de los aceites vegetales, provocó el aumento en la producción de oleaginosos, en base a un crecimiento continuo de la superficie sembrada de soja (O.P.Y.P.A., 2005). Este fenómeno, transformó la importancia relativa de los diferentes cultivos agrícolas en el país. Asimismo, se prevé que el crecimiento en la generación de fuentes de bioenergía a partir de materias primas vegetales, genere aumentos en la superficie de cultivos estivales.

Los cambios mencionados han producido un incremento significativo en la superficie de siembra de cultivos de verano y las perspectivas indican la profundización en dicha tendencia.

Las principales limitantes agrícolas en los cultivos de verano, realizados en secano, son diferentes a las presentadas en cultivos de invierno.

La disponibilidad hídrica, es la restricción principal al crecimiento y desarrollo de la agricultura de verano en el país, debido a la existencia de un período estival más o menos prolongado con deficiencias hídricas (Corsi, 1982).

Cabe destacar que la falta de agua, durante el transcurso de las etapas en las que se definen los componentes principales del rendimiento en grano de los cultivos, causa pérdidas significativas sobre la producción, Andrade, 1996.

El contenido de agua en suelo requerido durante el período crítico(PC) de determinación del rendimiento, es superior al demandado en el resto del ciclo fenológico. En el caso de que el volumen de agua en suelo durante el PC, no alcance a determinado porcentaje de agua disponible(AD), denominado nivel de agotamiento permisible(NAP), el rendimiento potencial de los cultivos se verá afectado negativamente.

De acuerdo a lo indicado por Molino et al, 2001, la mayoría de las regiones agrícolas del Litoral, poseen suelos con una capacidad de almacenamiento de agua disponible(CAAD) que varía entre 80 y 160mm. La CAAD de los suelos agrícolas, permite, en el mejor de los casos almacenar, antes de la siembra, aproximadamente un tercio de las necesidades de agua de los cultivos agrícolas. Esta característica de los suelos agrícolas determina una elevada dependencia de las recargas hídricas, durante el ciclo, para abastecer adecuadamente las necesidades de agua de los cultivos.

El régimen hídrico presenta una elevada variabilidad en las precipitaciones, lo cual provoca que la disponibilidad de agua sea habitualmente, la limitante principal de los cultivos de verano.

El estudio consistió en cuantificar la evolución de la disponibilidad hídrica promedio, en base a la realización de balances hídricos de suelos para soja y maíz, en condiciones de secano, en dos suelos y en dos localidades del Litoral contrastantes. Asimismo, se

¹ Ing. Agr. Dpto. de Prod. Vegetal Facultad de Agronomía Universidad de la República. Uruguay

planteó identificar el % de AD durante los diferentes estadios fenológicos y compararlo con el NAP.

MATERIALES Y METODOS

Se estimó la evolución del AD en suelo a través de la realización de balances hídricos, en suelos con CAAD de 120mm y 160mm. Se realizó el estudio en las localidades de Colonia y Salto, en los cultivos de soja y maíz.

Los balances hídricos de suelos, se desarrollaron bajo la siguiente expresión:

$\Delta S = P - ET_c$, siendo ΔS = variación de almacenaje de agua en suelo, P = precipitaciones diarias, ET_c = evapotranspiración diaria.

La ET_c fue estimada a través de la siguiente ecuación $ET_c = ET_o \times K_c$, siendo ET_o = evapotranspiración de referencia y K_c = coeficiente de cultivo. La ET_o de cada localidad, se estimó a través del método de Penman-Monteith (Allen et al, 1998) se utilizaron los datos climáticos de la serie 1960-2005 (INIA, 2007). Los K_c utilizados fueron los propuestos por FAO (Allen et al, 1998). Se utilizaron los registros de precipitaciones promedio de cada localidad, para la serie 1960-2005 (INIA, 2007), se consideró el 100% de la precipitación total como efectiva.

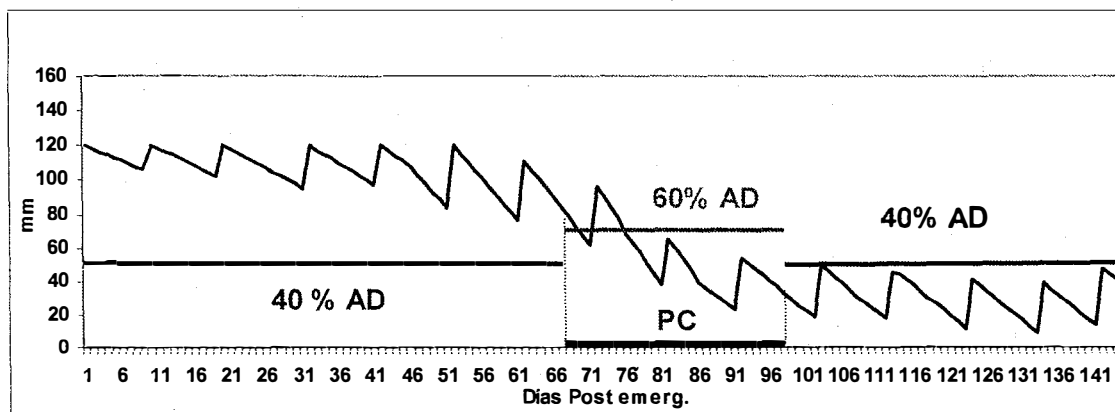
El inicio de los balances hídricos de suelos se tomó a partir del 10 de setiembre y 10 de noviembre para maíz y soja, respectivamente. Se consideró que al comienzo del balance hídrico los suelos presentaron el contenido hídrico de capacidad de campo.

La ubicación y duración del PC para la determinación del rendimiento en grano se tomó en maíz en base a los datos fenológicos obtenidos en la Evaluación Nacional de Cultivares (INIA-INASE, 2007) y en soja a partir de la información sobre fenología del GM VI obtenida en Giménez, 2007.

RESULTADOS Y DISCUSION

En las Figuras 1 y 2, se muestra la evolución del contenido de AD en suelo, en cultivos de maíz, realizados en Colonia, en dos suelos con CAAD de 120mm y 160mm, respectivamente.

Figura 1. Evolución del agua en suelos con CAAD de 120mm, cultivo de maíz, en la localidad de Colonia.



Se observa que en las condiciones de Colonia, durante las etapas vegetativas de maíz, ubicadas aproximadamente en los primeros 67 días del post emergencia, no ocurren

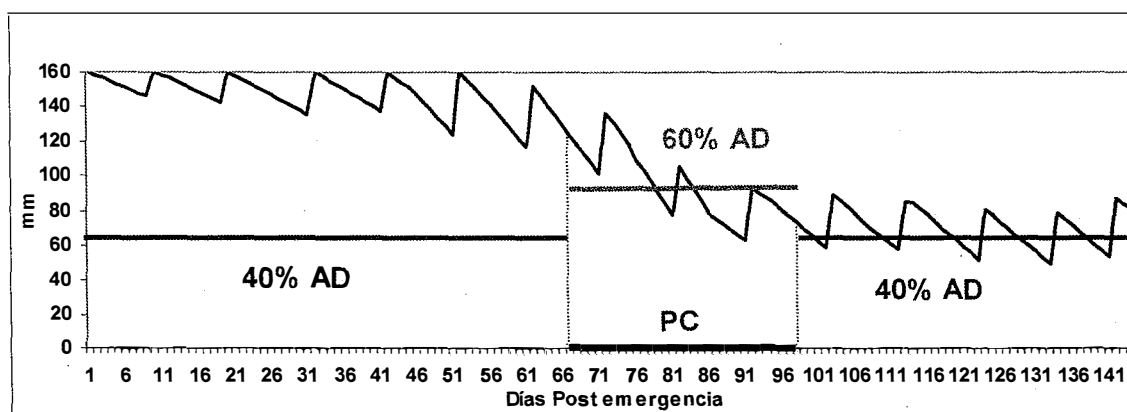
deficiencias hídricas y el volumen de agua en suelo es superior a los niveles considerados críticos de 40% AD.

De acuerdo a diversos estudios fisiológicos, desarrollados en maíz, el PC de determinación del rendimiento, se encuentra ubicado en los 30 días centrados en el inicio de la floración femenina. Las deficiencias hídricas en dicha etapa, provocan caídas significativas en el rendimiento potencial del cultivo (Grant et al, 1989; Hall et al, 1984; Andrade et al, 1996).

La disponibilidad hídrica favorable registrada en la parte vegetativa del ciclo, se mantiene durante el primer tercio del PC de maíz. Asimismo, en las Figuras 1 y 2, se muestra que posteriormente, ocurre una disminución del contenido de AD por debajo del NAP, considerado durante el PC de 60% AD. La disponibilidad hídrica es similar en ambos suelos, la cual compromete el potencial de rendimiento, debido a que el maíz presenta escasas posibilidades de compensación posterior.

Se destaca que en el suelo con CAAD de 120mm, el estatus hídrico de maíz, posteriormente al PC, durante la etapa de llenado de grano, presenta contenidos de AD inferiores a 40%.

Figura 2. Evolución del agua en suelo con CAAD de 160mm, cultivo de maíz, en la localidad de Colonia.



En el suelo con CAAD de 160mm, en la etapa de llenado de grano no se detectaron problemas hídricos destacables. Cabe destacar que en la etapa posterior al PC, la disponibilidad hídrica posee menor influencia sobre la determinación del rendimiento. De todas maneras, el peso promedio de grano se concreta en la etapa de llenado de grano.

El suelo con CAAD de 160mm, permitió mejorar la disponibilidad de agua para el cultivo, en relación al suelo de 120mm fundamentalmente en el llenado de grano. De todas maneras, los balances hídricos realizados indicaron que el AD, durante una parte sustancial del PC, se ubica en porcentajes por debajo del NAP, en ambos suelos.

En las condiciones promedio de Colonia, el cultivo de maíz presenta restricciones hídricas, fundamentalmente durante el PC, las cuales afectan negativamente el rendimiento potencial. En el suelo con menor CAAD, las restricciones continúan luego del PC, consecuentemente la disminución del rendimiento potencial es mayor.

En las Figuras 3 y 4, se presenta la evolución del contenido de AD en suelo, para soja en la localidad de Colonia, en las situaciones de suelos detalladas anteriormente.

Se puede observar que, durante las etapas vegetativas de soja, se comprobó un comportamiento hídrico similar al registrado en maíz, el AD durante esta etapa es elevada y no se presentan restricciones, en ambos suelos.

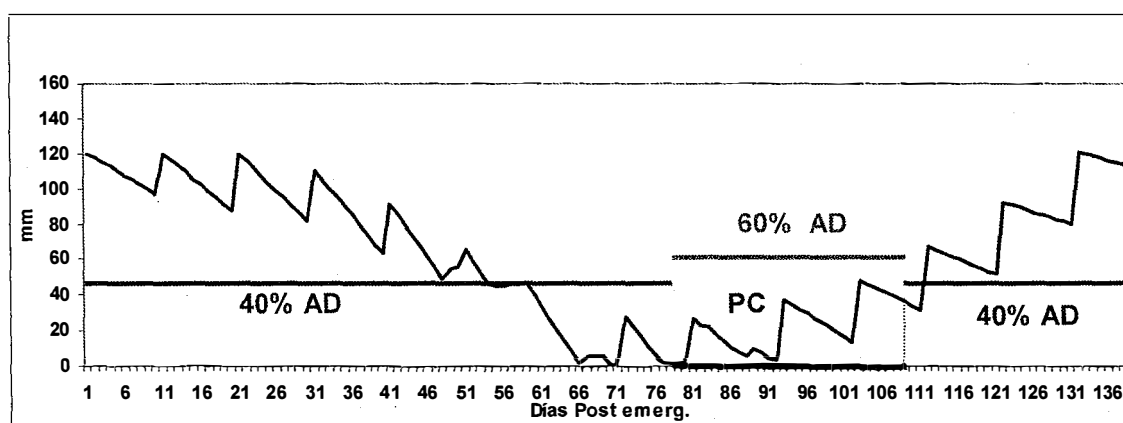
Se destaca en el suelo con CAAD de 120mm que antes del inicio del PC, el AD se encuentra en niveles ubicados por debajo del NAP.

Asimismo en la Figura 3, se muestra que durante la totalidad del PC el contenido de agua en suelo, continúa en valores por debajo del 60% de AD.

La soja presenta en general posibilidades de compensación ante deficiencias hídricas. De todas maneras, durante el transcurso del PC, la sensibilidad a la disponibilidad de agua es elevada y el potencial de compensación disminuye, debido a la elevada competencia por fotoasimilados, entre las diferentes estructuras reproductivas existentes en la planta (Kantolic et al, 2003).

De acuerdo a la disponibilidad hídrica constatada, en las condiciones promedio de Colonia, el rendimiento potencial de soja en suelos con CAAD de 120mm, se afecta severamente por deficiencias hídricas.

Figura 3. Evolución de agua en suelos con CAAD de 120mm, en cultivo de soja, en la localidad de Colonia.



En el caso de los suelos con CAAD de 160mm, los resultados de la evolución de agua observados en la Figura 4, indican que los contenidos hídricos de suelo son superiores, de todas maneras el PC transcurre en su totalidad, con contenidos de AD por debajo del NAP.

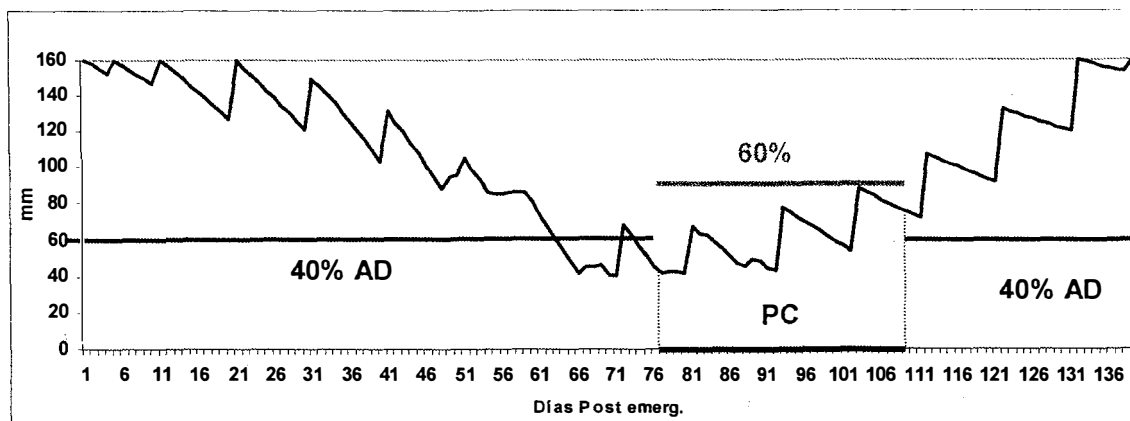
Se comprueba en soja, que bajo las condiciones promedio de Colonia, un suelo con mayor CAAD, en el rango analizado, no soluciona el problema hídrico durante el PC.

En las etapas de maduración, el contenido hídrico del suelo, se incrementó en porcentajes superiores al 40% de AD, independiente del suelo, por ese motivo no se constataron restricciones hídricas durante esta etapa.

Los balances hídricos realizados en la localidad de Colonia, en soja indican que durante el PC, el contenido de AD en suelo, es inferior al presentado en maíz.

Las diferencias en las disponibilidades hídricas entre maíz y soja, no se relacionan con diferentes consumos de agua por los cultivos, sino básicamente en la ubicación temporal en que ocurren los PC y a las diferentes fechas de siembra, lo cual determina cambios en las demandas evaporativas atmosféricas.

Figura 4. Evolución de agua en suelos con CAAD de 160mm, en cultivo de soja, en la localidad de Colonia.



Se muestra en las Figuras 5 y 6, la evolución del AD para maíz realizado en la localidad de Salto, en dos tipos de suelos con CAAD de 120mm y 160mm. Se observa que durante las diferentes etapas del ciclo de maíz, en las condiciones promedio no se presentan deficiencias hídricas, en los suelos analizados.

Figura 5. Evolución de agua en suelos con CAAD de 120mm, cultivo de maíz, en la localidad de Salto.

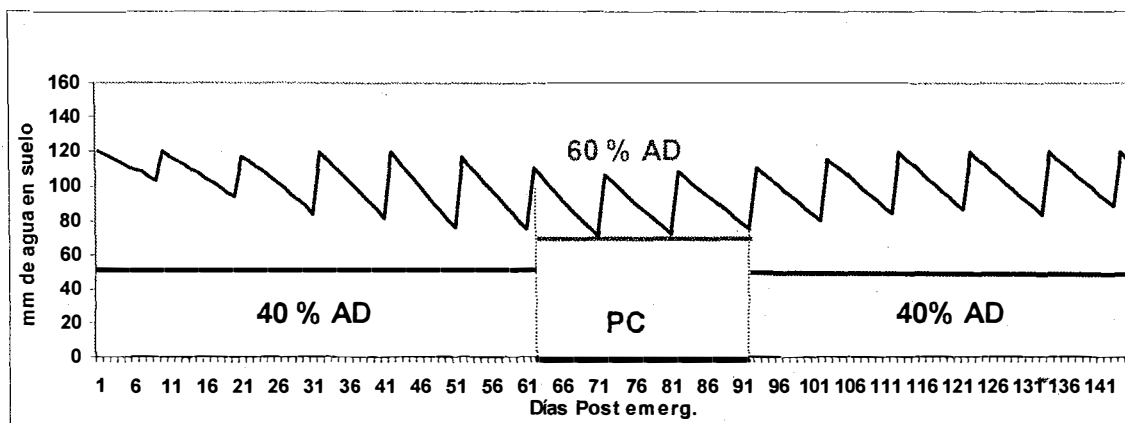
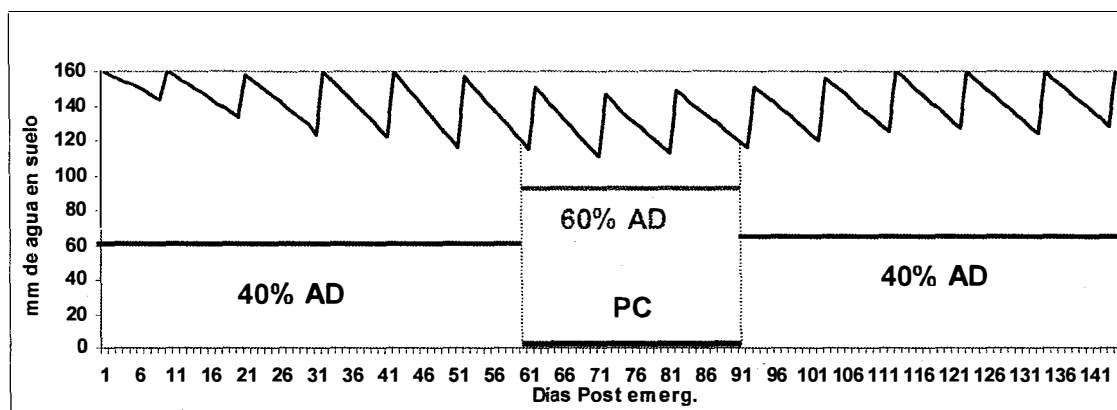


Figura 6. Evolución de agua en suelos con CAAD de 160mm, cultivo de maíz, en la localidad de Salto.



El rendimiento potencial de maíz, bajo las condiciones del análisis no sería afectado por la disponibilidad hídrica. Las causas por las cuales mejora el balance hídrico en la localidad de Salto en relación a Colonia, no obstante la mayor demanda atmosférica del norte, se debe a la ocurrencia de precipitaciones mayores en Salto. Se produce en el norte el acortamiento del ciclo y una anterior ubicación del PC, dadas las temperaturas superiores de la región.

Cabe aclarar que los mejores balances hídricos en Salto con respecto a Colonia, no implican mejores rendimientos potenciales.

Las condiciones climáticas del norte determinan temperaturas promedio elevadas, las cuales son beneficiosas durante el día, debido a que permiten altas tasas fotosintéticas y perjudiciales en la noche, dado que provocan el acortamiento de las diferentes etapas del ciclo fenológico.

En las Figuras 7 y 8, se muestra la evolución del contenido de AD en suelo, en la localidad de Salto, en el cultivo de soja, en suelos con CAAD de 120mm y 160mm respectivamente.

Figura 7. Evolución de agua en suelos con CAAD de 120mm, cultivo de soja, en la localidad de Salto.

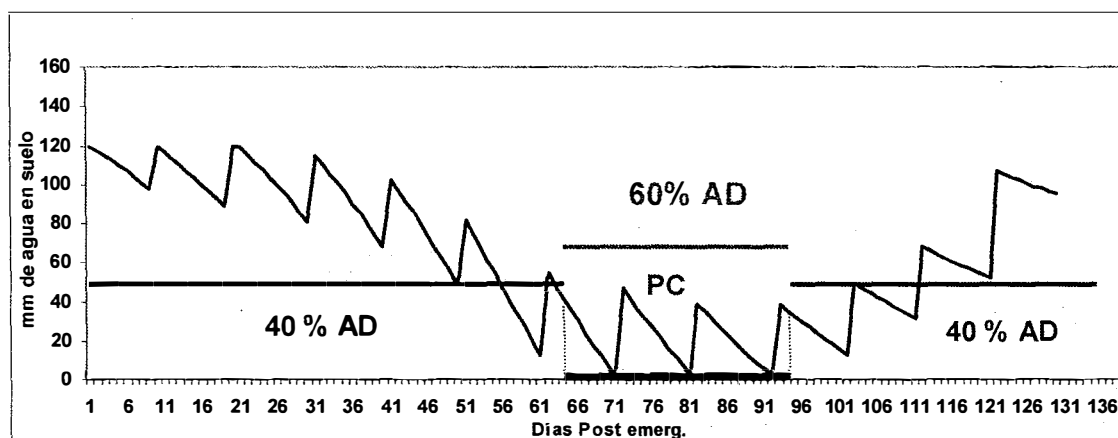
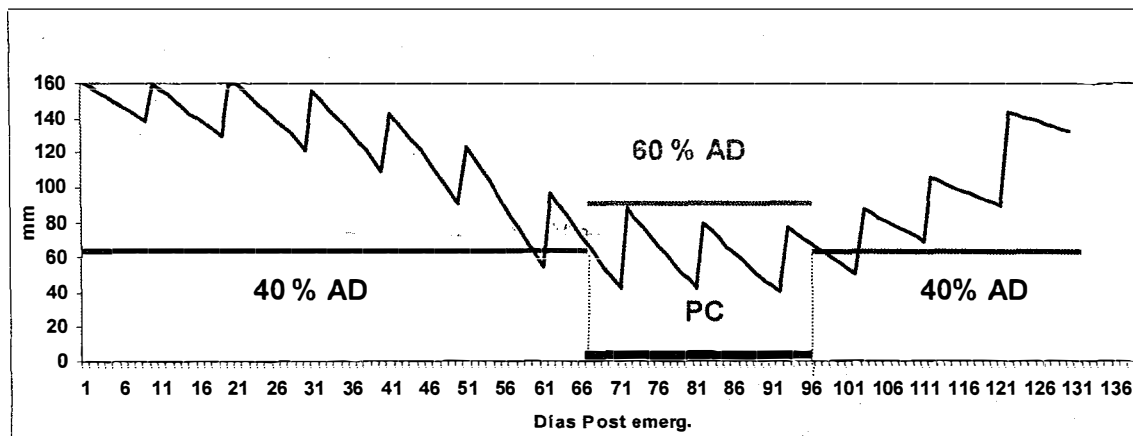


Figura 8. Evolución de agua en suelos con CAAD de 160mm, cultivo de soja, en la localidad de Salto.



Se observa que durante las etapas vegetativas del ciclo del cultivo, ubicadas aproximadamente en los primeros 50 días post emergencia, el AD se encuentra por encima del NAP, en ambos suelos.

En cambio, en las primeras etapas reproductivas, entre los estadios R1 y R3 (Fehr and Caviness, 1977), se presentan diferencias entre los suelos en el contenido de AD.

En el suelo con CAAD de 120mm, al inicio de las etapas reproductivas (R1) comienzan las deficiencias de AD, permaneciendo durante la totalidad del PC.

En cambio, en el suelo con CAAD de 160mm, durante el inicio de las etapas reproductivas no se registran problemas hídricos, los mismos comienzan al inicio del período más crítico de determinación del rendimiento o sea en la etapa R4.

En la Figura 8, se observa que durante la totalidad del PC, el contenido de agua en suelo, se encuentra por debajo del NAP.

En las etapas de maduración, en ambos suelos, se recupera el AD situándose en valores por encima de 40%.

En definitiva, en el cultivo de soja en Salto se presentaron deficiencias hídricas durante el PC, en ambos suelos. Por lo tanto, el rendimiento potencial de soja, en las condiciones promedio de Salto será afectado severamente por deficiencias hídricas y con mayor intensidad en los suelos con menor CAAD, debido a que las deficiencias hídricas comienzan al inicio de las etapas reproductivas y continúan hasta la maduración.

CONCLUSIONES

Las localidades en estudio presentaron diferencias en las demandas atmosféricas y en las precipitaciones promedio, consecuentemente las disponibilidades hídricas para los cultivos fueron distintas.

La localidad de Salto presentó mayores demandas evaporativas atmosféricas, sin embargo los balances hídricos de suelos mostraron mayor disponibilidad de agua, durante los PC de determinación del rendimiento, fundamentalmente en maíz. El comportamiento mencionado se debe a las mayores precipitaciones promedio que ocurren en el norte. Además, las temperaturas medias mayores de Salto, provocan el adelantamiento en la ubicación temporal de los PC y con ello la ocurrencia de menores demandas atmosféricas durante el transcurso de los PC.

Los suelos con mayor CAAD presentaron, en general, menor duración de los períodos de déficit hídrico. Sin embargo, persistieron las deficiencias de agua, debido a que las mismas fueron superiores a las diferencias entre las CAAD de los suelos evaluados.

El maíz mostró mayor disponibilidad hídrica durante el transcurso de los PC que el cultivo de soja, no obstante en Colonia, durante una parte significativa de los PC el AD fue deficitaria.

En el caso de Salto, el maíz presentó condiciones hídricas favorables en ambos suelos analizados. De todas maneras, el norte presenta temperaturas promedio que afectan el rendimiento potencial del cultivo, dicha situación amerita generar información en manejo que atenúe las temperaturas medias elevadas de la región.

El cultivo de soja, presentó disponibilidades hídricas desfavorables, en ambas localidades, prácticamente durante la totalidad de los PC.

La evolución de la disponibilidad de AD promedio para los cultivos, demuestra la existencia de problemas hídricos para concretar los rendimientos potenciales en maíz y en soja, debido a las deficiencias hídricas que se producen durante el transcurso de los etapas de mayor importancia en la concreción del rendimiento en grano.

De confirmarse los resultados obtenidos, en estudios complementarios, se señala la conveniencia de evaluar la utilización de riegos suplementarios y estratégicos que permitan aumentar la disponibilidad hídrica, en las etapas reproductivas, de ambos cultivos en el sur y de soja en el norte, del Litoral.

BIBLIOGRAFIA

- Allen, R.G.; Pereira, L.S. Raes, and D. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guides for computing crop water requirements. FAO Irrig. Drain. N° 56. Italy, 300 pp.
- Andrade, F.H., A.G. Cirilo, S.A. Uhart y M.E. Otegui, 1996. Ecofisiología del cultivo de Maíz ., 1ª Ed. Editorial La Barrosá . Dekalb Press y CERBAS-EEA INTA Balcarce(Ed). Balcarce, Argentina. 292 pp.
- Corsi, W.C. 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. Estación Experimental Agropecuaria La Estanzuela. C.I.A.A.B.
- Fehr, W.R. and C.E. Caviness. 1977. Stages of soybean development. Special Report 80. Iowa State University, Ames Iowa. 11p.
- Giménez L., 2007. Agrociencia. Revista Científica de la Facultad de Agronomía. Universidad de la República Oriental del Uruguay (En evaluación)
- Grant, R.; B. Jackson; J. Kiniry and G. Arkin. 1989. Water deficit timing effects on yield components in maize. Agronomy Journal, 81 61-65.
- Hall A. J.; J. Lemcoff, and N. Trápani. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield its components and their determinants. Maydica, 26: 19-38.
- INIA-INASE-INIA, 2007. Evaluación de cultivares. Disponible en <http://www.inia.org.uy/online/site/964811.php>
- INIA, 2007. GRAS. Clima. Estaciones Meteorológicas. Banco de Datos meteorológicos. Disponible en <http://www.inia.org.uy/online/site/14378211.php>
- Kantolic, A.G.; P.I. Giménez y E.B. de la Fuente, 2003. En: Satorre, R.L. Benech, G.A. Slafer, E.B. de la Fuente, D.J. Miralles, M.E. Otegui y R. Savin. Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Facultad de Agronomía. U.B.A. Argentina. 259-274 pp.
- Molino, J. y A. Calífra. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay. Segunda aproximación. División Suelos y Aguas. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. M.G.A.P. 12 pp.
- O.PYP.A. 2005. Oficina de Planeamiento y Políticas Agropecuarias. Anuario 2005. Oleaginosas y derivados. Situación actual y perspectivas. M.G.A.P.

MONITOREO Y DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN URUGUAY

José Luis Genta, Director Nacional (jlgenta@mvtma.gub.uy).

Nicolás Failache, Asesor (nfailache@mvtma.gub.uy),

Dirección Nacional de Aguas y Saneamiento – Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

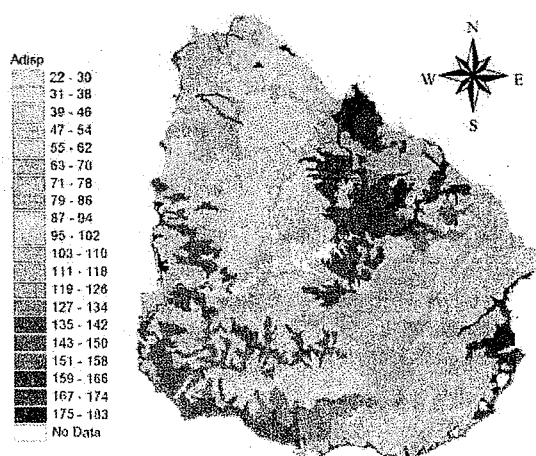
MONITOREO

En Uruguay existe un monitoreo de precipitaciones diarias y mensuales, y caudales diarios con series históricas de más de 50 años, y muchos de ellos con registros por más de 80 años. Los caudales son determinados a partir de los registros diarios de niveles y curvas de aforo. Dichas curvas son hechas a partir de datos de campañas de aforo, en ellas se mide un rango de caudales que generalmente debe ser extrapolado para caudales pequeños y grandes. El error en la medida de los caudales instantáneos (diarios o cada 12 y 8 horas) se estima entre el 15% y 30%, y en los caudales más pequeños del 50%. Dichos errores se compensan en forma significativa en los volúmenes acumulados mensuales y anuales.

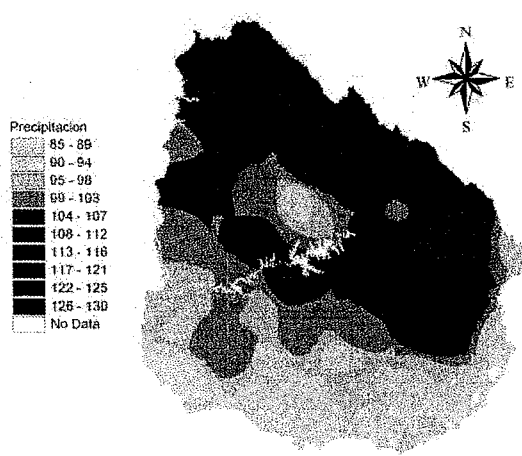
Las superficies de las cuencas de las estaciones de aforo son mayores a los 800 km², y en su mayor parte superiores a los 2000 km². Por tanto la posibilidad de modelación de las relaciones precipitación-escorrentía está asociada a cuencas de gran tamaño, con respecto a las superficies de las cuencas utilizadas para el almacenamiento de agua en tajamares y pequeños embalses.

MODELACION

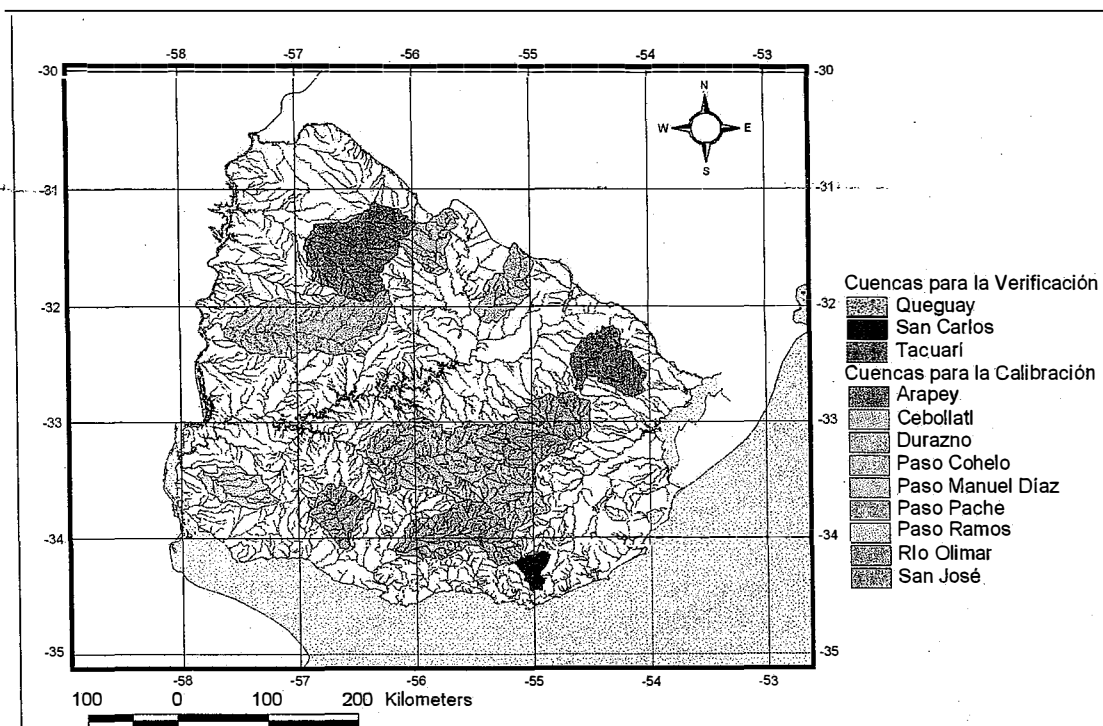
Para la estimación de los volúmenes de escurrimiento mensual se ha utilizado el modelo hidrológico de Temez, que considera además de las series históricas mensuales de precipitación y caudal, el ciclo medio anual de evapotranspiración potencial y la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos de la cuenca. A partir de la calibración y verificación en 12 cuencas aforadas con superficies entre 800 y 8000 km² se determinaron los cuatro parámetros del modelo, en el balance de agua en el suelo uno de los parámetros está asociado al Agua Disponible ($AD = \text{Capacidad de Campo} - \text{Punto de Marchitez}$), en las doce cuencas se tienen valores de 39 a 126 mm. La Dirección de Suelos y Aguas dispone para cuencas de éstas escalas una muy adecuada descripción de los suelos.



Valores de Agua Disponible de pasturas
(mm)

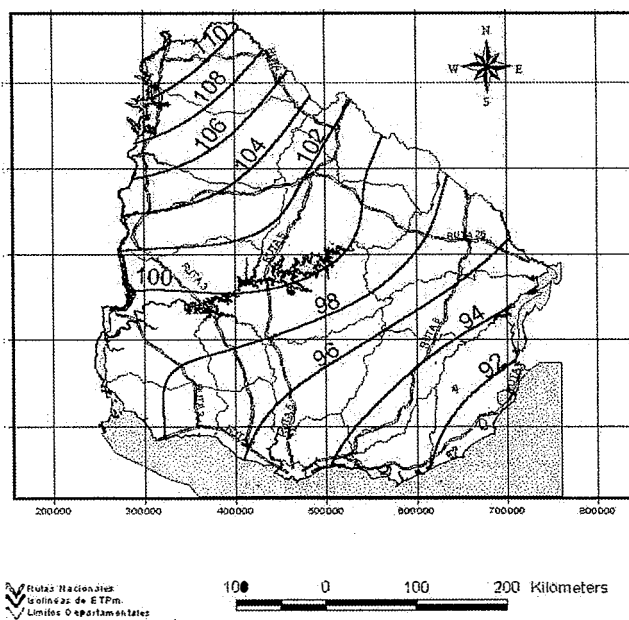


Precipitación media mensual del periodo 1970-99
(mm/mes)



Cuentas utilizadas en la calibración y verificación del modelo

Ene	1.88
Feb	1.56
Mar	1.37
Abr	0.88
May	0.58
Jun	0.36
Jul	0.37
Ago	0.47
Set	0.61
Oct	0.94
Nov	1.25
Dic	1.72



Evapotranspiración potencial de Penman y coeficientes de distribución del ciclo medio anual

MODELO DE TEMEZ

$$T_i = 0 \quad , \quad \text{si } P_i \leq P_{oi}$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_{oi})^2}{P_i + \delta_i - 2P_{oi}} \quad , \quad \text{si } P_i > P_{oi}$$

$$\delta_i = H_{\max} - H_{i-1} + ETP_i$$

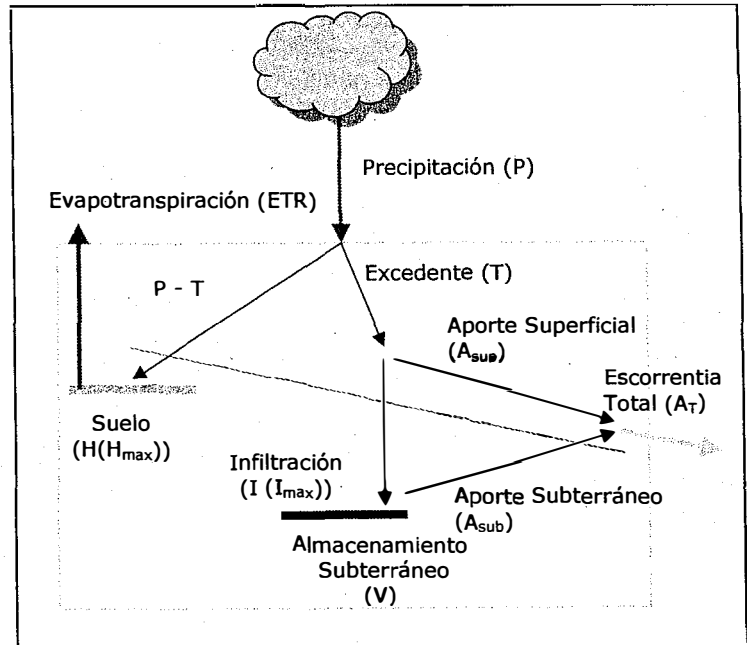
$$P_{oi} = CPO (H_{\max} - H_{i-1})$$

$$H_{\max} = CH_{\max} \cdot AD$$

$$H_i = \text{Max}(0, H_{i-1} + P_i - T_i - ETP_i)$$

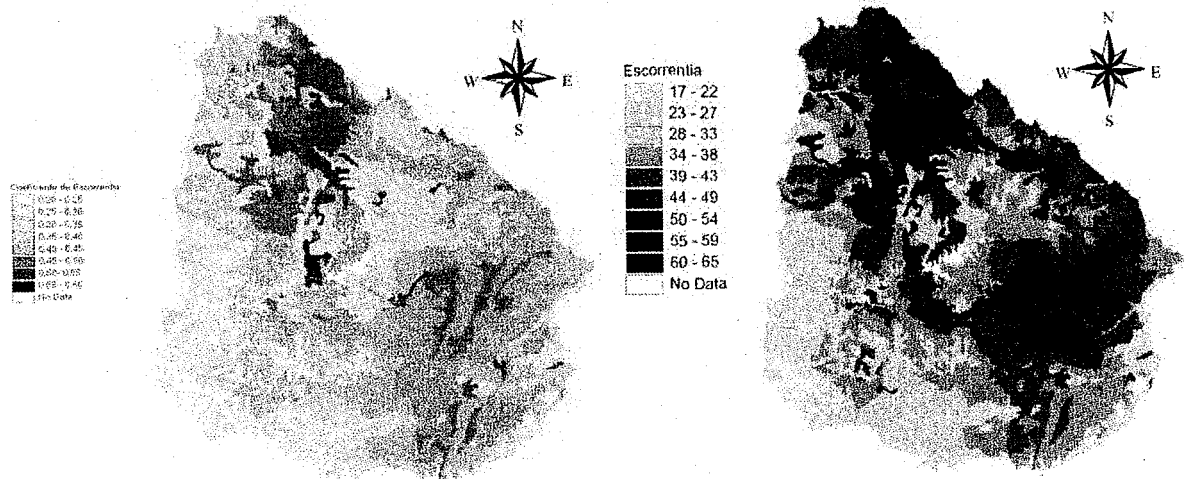
$$V_i = V_{i-1} \cdot e^{-\alpha} + I_{\max} \frac{T_i}{T_i + I_{\max}} \cdot e^{-\frac{\alpha}{2}}$$

$CPO = 1.5$	$\alpha = 0.078$
$I_{\max} = 334$	$CH_{\max} = 0.85$



$$A_{Ti} = T_i + V_{i-1} \cdot (e^{-\alpha} - 1) + I_{\max} \frac{T_i}{T_i + I_{\max}} \cdot e^{-\frac{\alpha}{2}}$$

Aplicación del modelo de Temez



Coefficientes de escorrentía

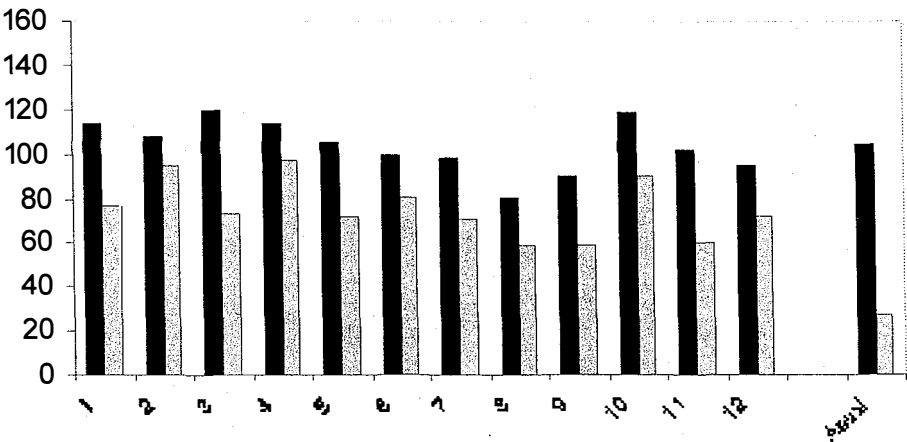
Escurrimientos medios (mm/mes)

DISPONIBILIDAD

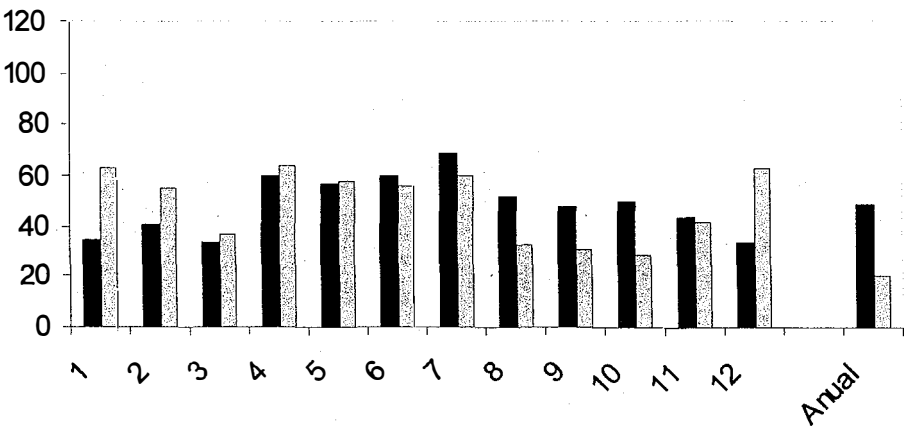
La disponibilidad de agua en el Uruguay, en término de valores acumulados mensuales, se caracteriza por ciclos anuales medios de precipitación uniformes y con una alta variabilidad interanual. Las desviaciones típicas de las precipitaciones mensuales son similares a la media de cada mes del año (“Si bien cada mes del año tiene una lluvia media de 100mm, cualquier mes puede llover más de 300mm o que no se registren lluvias”, de otra forma, “Encontrar un año similar al ciclo medio anual medio de precipitación tiene probabilidad cero”).

El ciclo anual medio de caudales está sensiblemente asociado al ciclo anual medio de evapotranspiración, y su ciclo anual de desviación típica es aún mayor que el de precipitación. No obstante la desviación típica de las precipitaciones y caudales anuales es sensiblemente menor que la media anual, por ello los embalses, de acuerdo a su tamaño relativo, permiten pasar de una alta desviación típica mensual a una desviación típica cercana a la anual.

En definitiva existe una alta incertidumbre en la disponibilidad mensual de agua, y los embalses disminuyen sensiblemente esa incertidumbre. Los pronósticos climáticos (estacionales, interanuales e interdecádicos) son una herramienta en desarrollo que también disminuye la incertidumbre.



PRECIPITACIÓN: Media (marrón) y Desviación Típica (rosada)



ESCORRENTIA: Media (marrón) y Desviación Típica (rosada)

DEMANDA

La satisfacción de la demanda de agua para riego se apoya en dos sistemas: las tomas directas y los embalses.

Tomas Directas:

Las tomas directas se establecen en cuerpos de agua con disponibilidad de agua todo el año, y los volúmenes a otorgar dependen de los valores mínimos de escurrimiento en los períodos de riego.

La División de Recursos Hídricos (Dirección Nacional de Hidrografía), las autorizaciones las otorga asegurando que aguas abajo se disponga de un caudal mínimo de 0.4 lts/s/km^2 . Esta condición rige para todo los suelos del país. Los caudales resultan de los valores mínimos aforados en ríos, no obstante muchas tomas se encuentran en arroyos no aforados.

Embalses:

La mayor parte de los embalses destinados a riego se ubican en cañadas o arroyos pequeños, con cuencas de aporte de menos de 20 km^2 . Los volúmenes de embalse dependen de: las condiciones topográficas (volumen embalsado respecto a volumen del dique); la demanda según cultivo y superficie cultivada; el régimen precipitación-escurrimiento en la cuenca.

La División de Recursos Hídricos, las autorizaciones las otorga condicionando que los volúmenes a embalsar no pueden superar el 95% del escurrimiento medio anual, y que se debe asegurar un caudal mínimo aguas abajo de 0.4 lts/s/km^2 . Los diseños de las obras deben ser presentados por profesionales ingenieros agrónomos, agrimensores o civiles. Las obras de más de $1:000.000 \text{ m}^3$ de volumen de embalse o 3 mts de altura del dique deben ser presentadas por ingenieros civiles.

CONCLUSIONES

Monitoreo:

Caudales Mínimos: Es necesario disponer de un sistema de aforo más adecuado para los caudales mínimos de los ríos y arroyos, así como una modelación de los mismos de forma de poder extenderlos a cuencas no aforadas o pobremente aforadas. Debe analizarse la influencia en los caudales mínimos, de los embalse y de las áreas regadas en las cuencas de aportes, dados los flujos subsuperficiales y pérdidas de los sistemas de riego allí generados (sensiblemente significativos en las zonas basálticas). Por lo tanto es necesario el monitoreo de las chacras y los cursos aguas debajo de las mismas.

Caudales Mensuales: Es necesario el monitoreo en los embalses, para verificar la representatividad de los escurrimientos mensuales estimados por Temez en cuencas entre 100 y 1000 veces mayores. Esto debe ser acompañado con un mayor detalle en la descripción de los suelos, tal cual existe en el departamento de Artigas. Es de hacer notar que a medida que se disminuye la cuenca de aporte el régimen hidrológico que determina el llenado del embalse es diferente, en los tajamares con cuencas de algunas decenas de hectáreas, se regulan por la frecuencia de determinados eventos de corta duración (horas o a lo sumo días). Con el aforo de los embalses, complementariamente se puede disponer de eventos extraordinarios que permitan una mejor certeza en el diseño de los vertederos de seguridad.

Riesgo: Diseño-Operación

Caudales Mensuales: Tanto para el diseño del volumen a embalsar como en la gestión de la disponibilidad del agua para riego, es necesario considerar el ***riesgo*** en no disponer de la disponibilidad de agua demandada para la superficie cultivada.

El uso de un modelo precipitación-escorrentía de paso mensual permite determinar el ***riesgo***, directamente calculado sobre la disponibilidad de agua para asegurar el agua demandada cada mes del año en un período tan extenso como las series históricas de precipitaciones mensuales disponibles. Ese análisis puede ser realizado a partir del balance hídrico mes a mes en el embalse, considerando los volúmenes de agua almacenados en el embalse al momento de decidir la superficie a cultivar, así como el pronóstico de precipitaciones durante el período de riego.

Trabajo de referencia

Failache N., Charbonnier F., Genta J.L., y Chreties Ch. “Calibración y regionalización de un modelo de balance hídrico mensual en cuencas uruguayas utilizando un algoritmo genético multiobjetivo” XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica de la IAHR, 2006, Guyana, Venezuela.

Failache N., Charbonnier F. y Genta J.L., “Modelo precipitación caudal: una herramienta para la gestión de los recursos hídricos en Uruguay”, IV Congreso Uruguayo de AIDIS, 2003, Punta del Este, Uruguay.

MODELO PRECIPITACION-CAUDAL: UNA HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN URUGUAY

Nicolás Failache (nicofail@fing.edu.uy), Federico Charbonnier (fcharbo@fing.edu.uy),
Jimena Alonso (jalonso@fing.edu.uy) y José Luis Genta (jlgenta@fing.edu.uy).

Sección Hidrología del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental IMFIA,
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, J. H. Reissig 565. Montevideo. Uruguay

RESUMEN

Frente al reto de gestionar en forma sostenible los Recursos Hídricos se presenta una herramienta para estimar la disponibilidad de agua superficial en el Uruguay, en régimen natural y para cualquier cuenca no aforada del país, implementada en un Sistema de Información Geográfico.

Esta herramienta se formula a partir de la calibración y verificación de un modelo de balance hídrico agregado de paso mensual en 12 cuencas (aforadas por la Dirección Nacional de Hidrografía) cuyas superficies van desde los 700 a los 9000 Km² (representan el 28% del territorio nacional) y que disponen de registros de caudal durante 15 años, en 6 de ellas, y 30 años en las 6 restantes.

A partir de la capa de información de valores de Agua Disponible, en formato raster con resolución de 1Km, para las 100 unidades de suelos presentes en el país, se generaron, mediante interpolación en cada celda, series temporales de precipitación y ciclos anuales medios de evapotranspiración mensual. A partir del modelo calibrado y regionalizado se generó una capa de volumen de escorrentía media y otra de coeficientes de escorrentía en cada celda.

En el Uruguay durante la década del 90 se registra un uso intensivo de los Recursos Hídricos, que ubica al país como el de mayor porcentaje de superficie agrícola bajo riego en la cuenca del Plata. Frente al desafío de la Gestión de los Recursos Hídricos, para la estimación de la disponibilidad de agua superficial en el Uruguay, se presenta una herramienta que es capaz de suministrar el volumen de escorrentía medio mensual, en régimen natural, para cualquier cuenca no aforada del país, implementada en un Sistema de Información Geográfico.

1.- INTRODUCCIÓN

En el Uruguay durante la década del 90 se registra un uso intensivo de los Recursos Hídricos, que ubica al país como el de mayor porcentaje de superficie agrícola bajo riego en la cuenca del Plata (GWP-SAMTAC, 2000), lo que ha generado la necesidad de explotar los escurrimientos superficiales de pequeñas cuencas a través de obras de regularización. Dado que en las pequeñas cuencas, de área menor a 1000 km², no existen aforos, se presenta una alternativa para estimar el escurrimiento, siempre que se disponga de información meteorológica y edafológica (precipitación, evapotranspiración potencial mensual y agua disponible de los suelos). Esta herramienta se formula a partir de la calibración y verificación de un modelo de balance hídrico agregado de paso mensual (Genta et al, 2001; IMFIA, 2002) teniendo en cuenta la información de caudal proveniente del monitoreo realizado por la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH) en las cuencas del país, la información de precipitación y meteorológica disponible en la Dirección Nacional de Meteorología (DNM) y la descripción de los suelos superficiales realizada por la Dirección de Suelos y Aguas.

Dadas las características del ciclo climático en el Uruguay fue necesario considerar un modelo precipitación-caudal que considera además el almacenamiento de agua en el suelo y el ciclo anual medio de la evapotranspiración potencial. De todos los modelos disponibles se eligió un modelo con parámetros simples de interpretar y con un buen comportamiento en su regionalización a partir de las características de los suelos.

2.- MODELO DE BALANCE HIDRICO EN LA CUENCA: MODELO DE TEMEZ.

El modelo de balance hídrico propuesto (Temez, 1977), es un modelo de cuatro parámetros, expresado en forma agregada, ya que trabaja con valores medios de las variables y parámetros y reproduce en forma simple y conceptual el ciclo hidrológico según el paso de tiempo de cálculo (en nuestro caso el mes).

El modelo considera dos capas de suelo, esencialmente representativas de la zona superior no saturada y la zona inferior saturada. Estas dos capas pueden ser consideradas como almacenamientos, generadoras de un flujo superficial rápido y lento respectivamente.

En la siguiente figura se describe conceptualmente el funcionamiento del modelo. Como se observa, una parte excedente (T) del agua que precipita (P), es drenada y sale por el cauce, mientras que el resto de esta agua (P-T) es almacenada en la primer capa de suelo. En esta capa del suelo se genera la evapotranspiración, y es posible además almacenar agua que pasa de un mes a otro.

La propuesta de Temez es sobre la forma en que se representa el excedente (T):

$$T_i = 0 \quad \text{si } P_i \leq P_{oi}$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_{oi})^2}{P_i + \delta_i - 2P_{oi}} \quad \text{si } P_i > P_{oi}$$

siendo

$$\delta_i = H_{\max} - H_{i-1} + ETP_i$$

$$\text{y } P_{oi} = CPo (H_{\max} - H_{i-1})$$

donde P_i es la precipitación en el mes i ; T_i es el excedente en el mes i ; $H_{\max}$ es la capacidad máxima de retención de agua en el suelo (primer parámetro del modelo); H_{i-1} es la humedad en el suelo al final del mes $i-1$; ETP_i

es la evapotranspiración potencial en el mes i ; siendo CPo el segundo parámetro del modelo. Una vez estimado el excedente, la humedad del suelo al final del período se obtiene mediante el siguiente balance.

$$H_i = \text{Max}(0, H_{i-1} + P_i - T_i - ETP_i)$$

Análogamente se obtiene la evapotranspiración real, imponiendo la condición de que su máximo es la potencial.

$$ETR_i = \min(H_{i-1} + P_i - T_i, ETP_i)$$

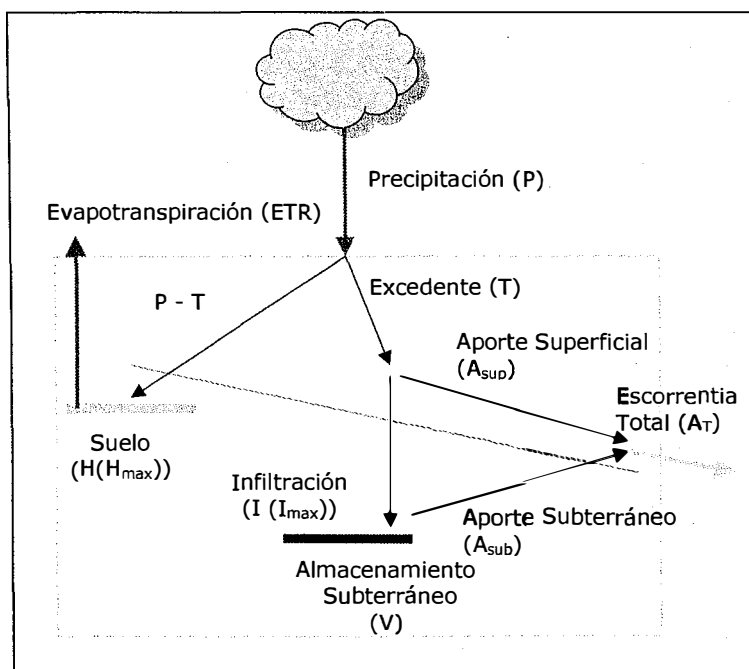


Figura 1. Esquema del Modelo de Temez

El modelo adopta una ley de infiltración potencial (I) al almacenamiento subterráneo que es función del excedente (T) y está acotada por un valor máximo ($I_{\max}$), que es el tercer parámetro del modelo:

$$I_i = I_{\max} \frac{T_i}{T_i + I_{\max}}$$

La infiltración (I) se convierte en potencial recarga para el almacenamiento subterráneo, dado que una parte importante puede ser devuelto al escurrimiento de ese período, en tanto que el resto forma parte del escurrimiento superficial drenado directamente por el cauce (T-I):

$$A_{\text{sup } i} = T_i - I_i$$

El almacenamiento subterráneo, al igual que el suelo, es una capa capaz de retener agua y también de entregarla. Para la distribución entre ambos se hace la hipótesis de que la cantidad de agua que se entrega (Q) es proporcional al volumen almacenado (V), definiéndose el cuarto parámetro (α).

$$V_i = V_{i-1} \cdot e^{-\alpha t} + I_i \cdot e^{\frac{-\alpha t}{2}}$$

Resultando el aporte subterráneo:

$$A_{\text{sub } i} = V_{i-1} - V_i + I_i$$

Por lo que la escorrentía total será:

$$A_{T_i} = A_{\text{sup } i} + A_{\text{sub } i}$$

3.- INFORMACION DISPONIBLE EN URUGUAY

Dada la importancia que tiene la capa superior del suelo en el modelo de balance hídrico se describe a continuación la información disponible en Uruguay sobre la Capacidad máxima de retención de agua y la Evapotranspiración Potencial.

AGUA DISPONIBLE DE LOS SUELOS DEL URUGUAY

Se define como Agua Disponible de un suelo a la diferencia entre su Capacidad de Campo y Punto de Marchitez, es decir es el máximo volumen de agua utilizable por la planta.

La División Suelos y Aguas de la Dirección de Recursos Naturales Renovables del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, en el año 2001 estimó el potencial de agua disponible de las 99 Asociaciones de Suelos cartografiadas en la base de datos actualizada (Molfino-Califra, 2001), correspondiente a los Suelos Dominantes y Asociados de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay escala 1:1.000.000 (MGAP, 1976).

Los valores de Agua Disponible fueron encontrados con ecuaciones empíricas que determinan la Capacidad de Campo, el Coeficiente de Marchitez Permanente y la densidad aparente, a partir de contenidos porcentuales de arena, limo, arcilla y materia orgánica en los horizontes de suelo.

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EN EL URUGUAY

La temperatura y la radiación solar, en el Uruguay, tienen un ciclo anual muy diferenciado entre el verano y el invierno, y poca variación interanual, por lo cual pueden ser bien representadas por un ciclo anual medio. Como la velocidad del viento y la humedad relativa tienen un ciclo anual relativamente uniforme, se opta por describir la evapotranspiración potencial por el mismo ciclo anual medio en todo el período de cálculo.

En todos los casos se considera como cobertura de los suelos pasturas, lo cual resulta razonable dado el tamaño de las cuencas a calibrar, y la prevalencia de esta cobertura en el Uruguay.

Para la estimación de la ETP se considera la fórmula de Penman, pues es la que incorpora las variables meteorológicas que intervienen en la ETP. Un análisis de los datos existentes en el Uruguay, muestra la imposibilidad de calcular la ETP mediante la fórmula de Penman en la mayoría de las estaciones meteorológicas del país. Si bien es posible calcular la ETP para todo el país a través de la fórmula empírica de Thornthwaite, dado que ésta subestima la ETP, es necesario corregirla según Penman. Se procedió a comparar en la estación La Estanzuela (INIA), las ETP calculadas por ambos procedimientos en el período 1970-99, En la Figura 2. se observa que la ETP de Penman se puede calcular multiplicando la de Thornthwaite por un valor de 1.38.

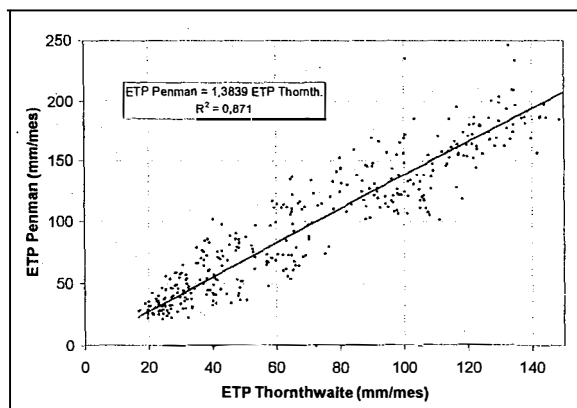


Figura 2. Relación entre la ETP de Penman y de Thornthwaite

Para la estimación de la ETP en cualquier punto del país, se procede a calcular los ciclos medios en las 13 estaciones meteorológicas del país con datos en el periodo 1970-99, y se adimensionalizaron a partir de su media mensual anual. En estos ciclos se observa una clara coincidencia, por lo que es posible representar el ciclo adimensionalizado, en cualquier punto del territorio, por el ciclo medio de los 13 ciclos anteriores. De esta manera si se conoce la media mensual en un punto, es posible calcular su ciclo medio de ETP, para ello se interpola en el mapa de isolíneas de ETP media mensual de Penman del Uruguay (Figura 3) y se multiplica por el ciclo medio adimensionalizado (Tabla I)

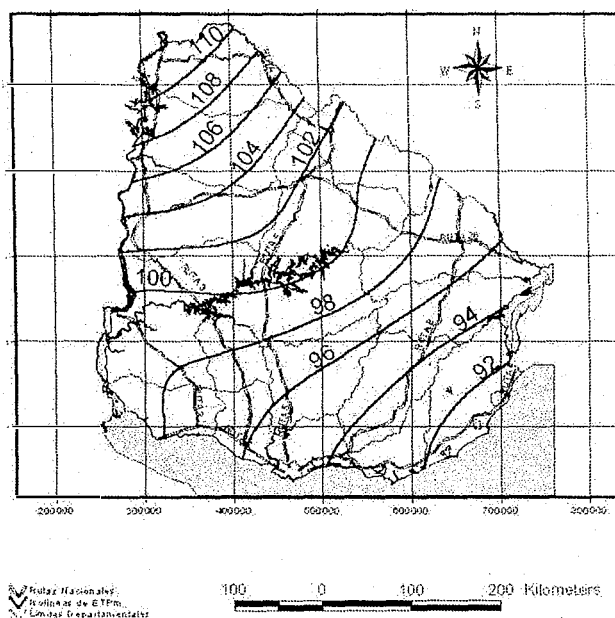


Figura 3. ETP media de Penman

Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1.88	1.56	1.37	0.88	0.58	0.36	0.37	0.47	0.61	0.94	1.25	1.72

Tabla I. Evapotranspiración potencial de Penman: coeficientes de distribución del ciclo medio anual

4.- CALIBRACIÓN DEL MODELO EN URUGUAY

Para estimar los parámetros del modelo: $H_{\max}$, C_{po} , $I_{\max}$ y α , se realizó la calibración del mismo, a partir de la información de escurrimiento mensual de 12 cuencas aforadas por la DNH.

CALIBRACION INDIVIDUAL

La calibración individual se hizo en dos etapas, en primer término considerándose como función objetivo maximizar el Número de Nash, variando los parámetros C_{po} , $I_{\max}$ y α , y considerando $H_{\max}=AD$. De esta manera se logra reproducir la forma de los hidrogramas medido y calculado, pero se tienen diferencias significativas entre los coeficientes de escorrentía.

Periodo 1970 - 99			Periodo 1985 - 99		
Cuenca	Area (Km ²)	Número de Datos	Cuenca	Area (Km ²)	Número de Datos
P. Pache	4900	339	Arapey	6958	116
Olimar	4680	328	Queguay	7866	167
S. José	2298	343	P.Ramos	2158	127
P. Cohelo	2467	335	Tacuari	3540	152
M.Díaz	2310	338	S. Carlos	796	171
Durazno	8750	340	Cebollati	2850	143

Tabla II. Cuencas aforadas

En segundo término se mantuvieron los valores calibrados de tres de los parámetros (C_{po} , $I_{\max}$ y α) y se recalibró el parámetro $H_{\max}$, utilizándose como función objetivo que la diferencia entre los coeficientes de escorrentía calculados y medidos sea mínima. Se observó que la disminución de los coeficientes de Nash fue mínima, evidenciando que la forma del hidrograma depende fundamentalmente de los parámetros no recalibrados.

En forma complementaria se midió la desviación entre los hidrogramas medidos y calculados mediante el coeficiente de correlación. (Ver Tabla III)

Cuenca	Parámetros calibrados				Número de Nash	Correlación (medidos y calculados)	Coeficiente de escorrentía	
	Hmax (mm/mes)	Cpo	α (1/día)	I _{max} (mm/mes)			medido	simulado
P. Pache	78.2	0.38	0.07	266	0.71	0.85	0.36	0.37
Olimar	56.3	0.53	0.07	88	0.75	0.87	0.46	0.43
San José	102.3	0.30	0.08	182	0.74	0.86	0.32	0.33
Paso Cohelo	75.8	0.11	0.07	106	0.73	0.85	0.42	0.44
Manuel Díaz	90.4	0.25	0.08	12349	0.72	0.85	0.41	0.41
Durazno	76.1	0.42	0.11	13715	0.70	0.84	0.39	0.38
Arapey	31.3	0.71	0.12	4347	0.77	0.88	0.42	0.43
Queguay	62.3	0.67	0.08	50000	0.70	0.84	0.33	0.34
Paso Ramos	115.6	0.14	0.08	38983	0.67	0.82	0.32	0.32
Tacuari	91.2	0.48	0.11	6295	0.75	0.87	0.36	0.38
San Carlos	62.8	0.81	0.11	379	0.73	0.86	0.34	0.30
Cebollati	58.3	0.32	0.07	271	0.76	0.87	0.41	0.41

Tabla III. Resultados de Calibración.

CALIBRACIÓN REGIONAL

Las calibraciones individuales son válidas para la aplicación en la respectiva cuenca, no obstante dado que el objetivo es disponer de una relación precipitación escurrimiento en cualquier cuenca del país, se considera recalibrar las cuencas regionalizando los parámetros (Fernández, 2000).

En la precipitación y en la evapotranspiración ya están consideradas las variaciones espaciales, por lo que resta tomar en cuenta las variaciones en el comportamiento de las capas de suelo entre las diferentes cuencas. La capa superior se asocia a los suelos superficiales (suelo vegetal), que han sido clasificados según la profundidad y tipo de suelo en la Carta de Suelos del Uruguay (MGAP, 1976). En 1989 y luego en 2001 la División de Suelos y Aguas del MGAP caracterizó dichos suelos según el parámetro de almacenamiento “Agua Disponible” (Molfino-Califra, 2001).

El parámetro $H_{\max}$ representa, en el modelo de Temez, la capacidad máxima de retención de agua del suelo al final de cada mes, dada la definición de “Agua Disponible” se optó por proponer una relación proporcional con dicho parámetro:

$$H_{\max} = CAD * AD$$

De la calibración individual de cada cuenca se observó la sensibilidad que tiene el modelo a la variación de cada uno de los parámetros, encontrándose que el modelo no tiene gran sensibilidad en los parámetros CPo , $I_{\max}$ y α . Por este motivo se decidió en la calibración regional calibrar un solo valor de ellos para todo el país.

La calibración regional se realiza al igual que en la individual en dos etapas, en una primera instancia se calibraron los parámetros CPo , $I_{\max}$ y α , y se fijó $H_{\max}=AD$, minimizando la función objetivo a partir del número de Nash:

$$\sum |Nash \text{ Individual} - Nash \text{ Regional}|$$

Y en una segunda etapa se calibró el parámetro CAD minimizando la función objetivo a partir de los coeficientes de escurrentía:

$$\sum |C_{\text{calculado}} - C_{\text{medido}}|$$

Se opta además por calibrar en 9 de las cuencas, y luego verificar en las 3 restantes. Los valores de CAD , CPo , $I_{\max}$ y α . calibrados son los siguientes:

Parámetro	CAD	CPo	α (1/día)	$I_{\max}$ (mm)
Valor calibrado	0.92	0.30	0.0775	386

Los resultados obtenidos en la calibración son:

Cuenca	Agua Disponible	Hmax	Número de Nash	Correlación (medidos y calculados)	Coeficiente de Escurrentía	
	(mm)	(mm/mes)			Medido	Simulado
P. Pache	91.4	83.7	0.71	0.84	0.36	0.37
Olimar	73.3	67.2	0.74	0.87	0.46	0.44
S. José	111.6	102.2	0.73	0.86	0.32	0.33
P. Cohelo	101.4	92.9	0.71	0.85	0.42	0.38
M. Díaz	102.8	94.2	0.70	0.84	0.41	0.40
Durazno	90.3	82.8	0.70	0.84	0.39	0.39
Arapey	37.3	34.1	0.76	0.89	0.42	0.46
Queguay	68.9	63.1	0.65	0.82	0.33	0.39
P. Ramos	127.5	116.8	0.65	0.82	0.32	0.28

Tabla IV. Resultados de calibración

Los resultados obtenidos en la verificación son:

Cuenca	Agua Disponible	Hmax	Número de Nash	Correlación (medidos y calculados)	Coeficiente de Escurrentía	
	(mm)	(mm/mes)			Medido	Simulado
Tacuari	97.0	88.9	0.74	0.87	0.36	0.41
S. Carlos	66.2	60.7	0.68	0.83	0.34	0.38
Cebollati	72.8	66.7	0.76	0.87	0.41	0.40

Tabla IV. Resultados de verificación

5.- HERRAMIENTA PROPUESTA PARA LA GESTION DE RECURSOS HIDRICOS

INFORMACION UTILIZADA

De la muy amplia información pluviométrica disponible en el Uruguay se seleccionaron 52 de las estaciones pertenecientes a la Dirección Nacional de Meteorología (DNM), de las cuales se utilizaron los registros mensuales del periodo 1970-1999, que corresponde al período con información de caudal en por lo menos 12 cuencas

Se utilizaron 11 estaciones meteorológicas de la DNM para el cálculo de la ETP de Thornthwaite y la estación La Estanzuela del INIA para el cálculo de la ETP de Penman.

Los valores de Agua Disponible de los suelos del Uruguay se determinaron a partir de la carta 1:1.000.000 en formato raster con celdas de 1000 metros, elaborada por la División de Suelos y Agua del MGAP.

APLICACIÓN GIS E INTERPOLACION

A partir de los pluviómetros y utilizando un método de inversa de la distancia al cuadrado se interpolan los valores mensuales de las series de precipitación. De igual manera se interpolan valores de ETPm, que se distribuyen según el ciclo mencionado. A modo de ejemplo en la Figura 4. se presentan los valores de precipitación media mensual en el período 1970-99.

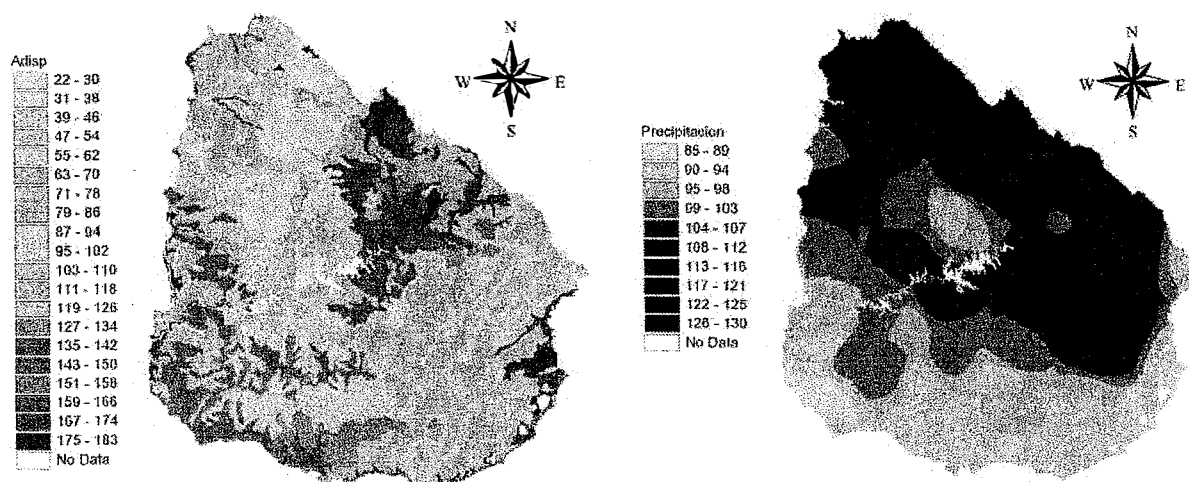


Figura 4. Valores de Agua Disponible de pasturas en mm (izquierda) y precipitación media mensual del periodo 1970-99 en mm/mes (derecha).

6.- RESULTADOS

A partir de los valores interpolados de los registros mensuales de precipitación y los valores medios mensuales de ETP, y utilizando las cobertura de valores de Agua Disponible de los suelos, se aplica el modelo de balance hídrico en cada celda, y se obtienen en cada una de ellas los valores mensuales de escurrimiento. Como subproducto se determinan las series de valores de ETR y humedad del suelo al final de cada mes. Para ejemplificar los resultados de la aplicación del modelo, se presentan los valores de coeficiente de escorrentía y de escurrimientos medios del Uruguay en el período 1970-99 (ver Figura 5.)

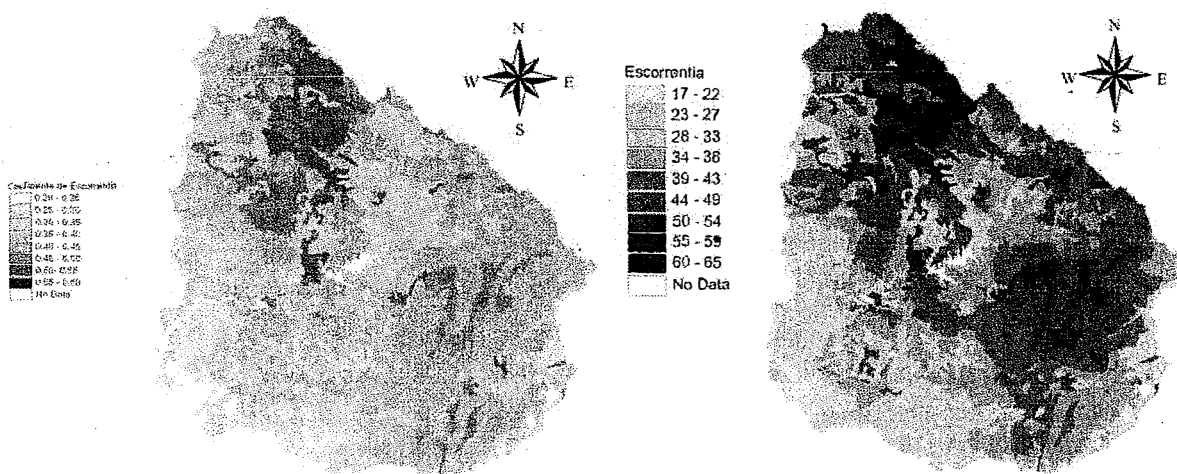


Figura 5. Coeficientes de escorrentía (izquierda) y escurrimientos medios en mm/mes (derecha).

7.- CONCLUSIONES

Se dispone de una herramienta que genera información para gestionar en forma sostenible los Recursos Hídricos en el Uruguay. En combinación con un modelo digital del terreno es posible determinar en cualquier cuenca del país, el volumen de escurrimiento medio, para una gestión simple, o las series de escurrimientos mensuales, que se utilizan como datos de entrada para modelos más complejos de gestión como el Mike Basin o el Aquarius.

Asimismo es posible combinar la metodología con los pronósticos climáticos, principalmente los de precipitación, lo que se presenta como una herramienta importante para planificar las actividades agrícolas.

Teniendo en cuenta la interpretación física de los parámetros es posible extender la metodología a cuencas con un uso de suelo muy diferente a las pasturas, por ejemplo la forestación, incorporando los valores de evapotranspiración y Agua Disponible correspondientes.

Al disponerse de las series de evapotranspiración real y de almacenamiento de agua en el suelo es posible identificar los meses y los suelos en los que es esperable, de acuerdo a los volúmenes de precipitación, un estrés hídrico en las pasturas.

Agradecimientos

Para la realización de este trabajo se tuvo el apoyo de la Dirección Nacional de Hidrografía (MTO), la Dirección Nacional de Meteorología (MDN) y la Dirección de Suelos y Aguas (MGAP), especialmente en la ejecución del Proyecto "Directivas de diseño hidrológico-hidráulico de pequeñas represas" realizado en el IMFIA y financiado por el MTO-DNH y la UdelaR-CSIC, del cual es un subproducto, a sus autoridades y profesionales nuestro agradecimiento.

Bibliografía

- MGAP, Dirección de Suelos y Aguas; “Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000”, 1976.
- Genta J.L., F. Charbonnier & N. Failache; Modelo Regional de Balance Hídrico Mensual para Cuencas no Aforadas en Uruguay . IV Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chillán, Chile, 9-11 de mayo de 2001.
- GWP-SAMTAC, Agua para el Siglo XXI, de la Visión a la Acción. Documento presentado a la Conferencia Ministerial del Segundo Foro Mundial en la Haya, Holanda. 17-22 de marzo de 2000.
- IMFIA-DNH-PHI-UNESCO; Balances Hídricos superficiales del Uruguay, 2002.
- Molfino J.H.; Califra A.; “Agua Disponible de las Tierras del Uruguay”, División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca Mayo de 2001.
- Temez J.R.; Modelo matemático de transferencia precipitación aportación. ASINEL 1977.
- Fernandez, W., R. M. Vogel & A. Sankarasubramanian; Regional calibration of a watershed model Hydrological Sciences—Journal—des Sciences Hydrologiques, 45(5) October 2000, pp. 689–708.

**XXII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CIUDAD GUAYANA, VENEZUELA, OCTUBRE 2006**

**CALIBRACION Y REGIONALIZACION DE UN MODELO DE BALANCE
HIDRICO MENSUAL EN CUENCAS URUGUAYAS UTILIZANDO UN
ALGORITMO GENETICO MULTI OBJETIVO**

Nicolás Failache Gallo, Federico Charbonnier, José Luis Genta y Christian Chreties

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Universidad de la República, Uruguay

nicofail@fing.edu.uy, fcharbo@fing.edu.uy, jlgenta@fing.edu.uy, chreties@fing.edu.uy,

RESUMEN:

En Uruguay para el diseño de pequeñas obras de regulación y para la gestión de los Recursos Hídricos es necesario utilizar modelos hidrológicos que usen la información meteorológica y edafológica disponible con parámetros regionalizados. Con la información disponible de escurrimientos superficiales medidos, información meteorológica y de precipitación y la descripción de los suelos superficiales se calibra un modelo de balance hídrico mensual, en forma individual en cada una de las 12 cuencas y luego se regionaliza empleando 9 cuencas y se verifica en las restantes 3. Para la calibración individual del modelo de balance hídrico en la cuenca se utiliza el algoritmo genético multi-objetivo MOSCEM-UA (Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis – University of Arizona), minimizando dos funciones objetivos: 1-Número de Nash-Sutcliffe y la diferencia de volúmenes escurridos medidos y calculados. Para la calibración regional se usa 18 funciones objetivos (las dos funciones empleadas para la calibración individual en cada una de las 9 cuencas usadas para la calibración).

ABSTRACT:

In Uruguay for the design of small works of regulation and for the management of the Water Resources is necessary to utilize hydrologic models that use the available weather and soil information with regional parameters. With the available information of runoff measured, weather information and of haste and the description of the superficial floors is calibrated a model of monthly water balance, in individual form in each one of the 12 basins and then itself regional employing 9 basins and is verified in the remainders 3. For the individual calibration of the model of water balance in the basin the algorithm is utilized genetic multi-objective MOSCEM-UA (Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis – University of Arizona), minimizing two objective functions: 1-number of Nash-Sutcliffe and the difference of volumes drained measured and calculated. For the regional calibration is used 18 objective functions (the two employed functions for the individual calibration in each one of the 9 basins used for the calibration).

PALABRAS CLAVES: modelo mensual precipitación-escurrimiento, regionalización, calibración

INTRODUCCIÓN

En Uruguay debido a las características del ciclo climático es necesario para usar y gestionar los Recursos Hídricos del país la realización de pequeñas obras de regularización. Dado que en las pequeñas cuencas, de área menor a 1000 km², no existen aforos, es necesario utilizar modelos hidrológicos que usen la información meteorológica y edafológica disponible (precipitación, evapotranspiración potencial mensual y agua disponible de los suelos) con parámetros regionalizados (Fernandez et. al., 2000)

Con la información disponible de escurrimientos superficiales medidos mediante el monitoreo realizado por la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH) en las cuencas del país, la información meteorológica y de precipitación disponible en la Dirección Nacional de Meteorología (DNM) y la descripción de los suelos superficiales realizada por la Dirección de Suelos y Aguas, se calibra un modelo de balance hídrico agregado de paso mensual, en forma individual en cada cuenca y luego se regionaliza y se verifica.

Matemáticamente la calibración es un problema de infinitas soluciones igualmente posibles ya que existen mas ecuaciones que incógnitas pudiendo existir soluciones que no representan la realidad lógica del problema y que tengan valores no esperados de los parámetros. Por otro lado existen varias soluciones que poseen justificación técnica adecuada para el problema entre las cuales no es posible distinguir cual es la mas aceptable (Collischonn, 2003). Es decir no existe un conjunto único de parámetros capaz de representar los procesos hidrológicos, debido a las incertidumbres inherentes a los datos, de la simplificaciones de los modelos y de las representatividad de los parámetros.

Los algoritmos genéticos con funciones multi-objetivo ofrecen posibilidades interesantes en este sentido, siendo su principales características que se calibra optimizando varias funciones objetivos y que la solución en general no será única y por lo tanto es una región denominada región de Pareto o región de soluciones no dominadas. La definición de la región de Pareto soluciona el problema de optimización en la medida que divide las infinitas soluciones posibles en optimas y no optimas. Las soluciones clasificadas como optimas pueden pasar por un análisis posterior.

Para la calibración individual del modelo de balance hídrico en la cuenca se utiliza el algoritmo genético multi-objetivo MOSCEM-UA (Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis – University of Arizona), minimizando dos funciones objetivos: 1-Número de Nash-Sutcliffe y la diferencia de volúmenes escurridos medidos y calculados. Para la calibración regional se usa 18 funciones objetivos (las dos funciones empleadas para la calibración individual en cada una de las 9 cuencas usadas para la calibración).

ESQUEMA GENERAL DEL MODELO DE BALANCE HIDRICO EN LA CUENCA

El modelo de balance hídrico propuesto (Temez, 1977), es un modelo de cuatro parámetros, expresado en forma agregada, ya que trabaja con valores medios de las variables y parámetros y reproduce en forma simple y conceptual el ciclo hidrológico según el paso de tiempo de cálculo (en nuestro caso el mes).

El modelo considera dos capas de suelo, esencialmente representativas de la zona superior no saturada y la zona inferior saturada. Estas dos capas pueden ser consideradas como almacenamientos, generadoras de un flujo superficial rápido y lento respectivamente.

En la Figura 1 se describe conceptualmente el funcionamiento del modelo. Como se observa, una parte excedente (T) del agua que precipita (P), es drenada y sale por el cauce, mientras que el resto de esta agua (P-T) es almacenada en la primer capa de suelo. En esta capa del suelo se genera la evapotranspiración, y es posible además almacenar agua que pasa de un mes a otro.

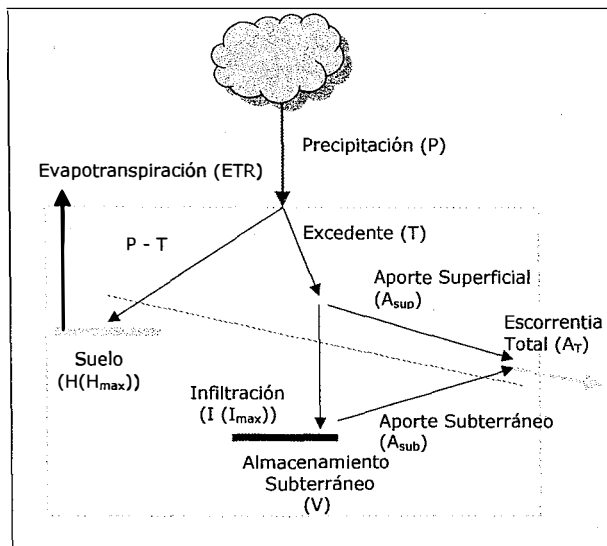


Figura 1.- Esquema general del modelo de balance hídrico en la cuenca.

La propuesta de Temez es sobre la forma en que se representa el excedente (T):

$$T_i = 0 \quad \text{si } P_i \leq P_{oi}$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_{oi})^2}{P_i + \delta_i - 2P_{oi}} \quad \text{si } P_i > P_{oi} \quad [1]$$

siendo: $\delta_i = H_{\max} - H_{i-1} + ETP_i$ [2]

$$P_{oi} = CP_o (H_{\max} - H_{i-1}) \quad [3]$$

donde P_i es la precipitación en el mes i ; T_i es el excedente en el mes i ; $H_{\max}$ es la capacidad máxima de retención de agua en el suelo (primer parámetro del modelo); H_{i-1} es la humedad en el suelo al final del mes $i-1$; ETP_i es la evapotranspiración potencial en el mes i ; siendo CP_o el segundo parámetro del modelo.

Una vez estimado el excedente, la humedad del suelo al final del período se obtiene mediante el siguiente balance:

$$H_i = \text{Max} (0, H_{i-1} + P_i - T_i - ETP_i) \quad [4]$$

Análogamente se obtiene la evapotranspiración real, imponiendo la condición de que su máximo es la potencial:

$$ETR_i = \min (H_{i-1} + P_i - T_i, ETP_i) \quad [5]$$

El modelo adopta una ley de infiltración potencial (I) al almacenamiento subterráneo que es función del excedente (T) y está acotada por un valor máximo ($I_{\max}$), que es el tercer parámetro del modelo:

$$I_i = I_{\max} \frac{T_i}{T_i + I_{\max}} \quad [6]$$

La infiltración (I) se convierte en potencial recarga para el almacenamiento subterráneo, dado que una parte importante puede ser devuelto al escurrimiento de ese período, en tanto que el resto forma parte del escurrimiento superficial drenado directamente por el cauce (T-I):

$$A_{\text{sup } i} = T_i - I_i \quad [7]$$

El almacenamiento subterráneo, al igual que el suelo, es una capa capaz de retener agua y también de entregarla. Para la distribución entre ambos se hace la hipótesis de que la cantidad de agua que se entrega (Q) es proporcional al volumen almacenado (V), definiéndose el cuarto parámetro (α).

$$V_i = V_{i-1} \cdot e^{-\alpha t} + I_i \cdot e^{\frac{-\alpha t}{2}} \quad [8]$$

Resultando el aporte subterráneo:

$$A_{sub\ i} = V_{i-1} - V_i + I_i \quad [9]$$

Por lo que la escorrentía total será:

$$A_{Ti} = A_{sup\ i} + A_{sub\ i} \quad [10]$$

DATOS UTILIZADOS

Para el presente trabajo fueron utilizados los datos de caudal medio mensual en las estaciones presentadas en la Tabla 2, suministrados por la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH) en los periodos indicados. Para cada cuenca y en el mismo periodo de datos de escurrimiento se usa la información pluviométrica mensual de estaciones pertenecientes a la Dirección Nacional de Meteorología (DNM) empleando el método de Thiessen para obtener el valor promedio asociado a la misma (IMFIA-DNH-PHI-UNESCO, 2002).

Para la caracterización de los suelos se define Agua Disponible de un suelo a la diferencia entre su Capacidad de Campo y Punto de Marchitez, es decir es el máximo volumen de agua utilizable por la planta. La División Suelos y Aguas de la Dirección de Recursos Naturales Renovables del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, en el año 2001 estimó el potencial de agua disponible de las 99 Asociaciones de Suelos cartografiadas en la base de datos actualizada (Molfino-Califra, 2001), correspondiente a los Suelos Dominantes y Asociados de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay escala 1:1.000.000 (MGAP, 1976). Los valores de Agua Disponible fueron encontrados con ecuaciones empíricas que determinan la Capacidad de Campo, el Coeficiente de Marchitez Permanente y la densidad aparente, a partir de contenidos porcentuales de arena, limo, arcilla y materia orgánica en los horizontes de suelo.

En todos los casos se considera como cobertura de los suelos pasturas, lo cual resulta razonable dado el tamaño de las cuencas a calibrar, y la prevalencia de esta cobertura en el Uruguay.

La temperatura y la radiación solar, en el Uruguay, tienen un ciclo anual muy diferenciado entre el verano y el invierno, y poca variación interanual, por lo cual pueden ser bien representadas por un ciclo anual medio. Como la velocidad del viento y la humedad relativa tienen un ciclo anual relativamente uniforme, se opta por describir la evapotranspiración potencial por el mismo ciclo anual medio en todo el periodo de cálculo.

Para la estimación de la ETP se considera la fórmula de Penman, pues es la que mejor considera las variables meteorológicas que intervienen en la ETP. Sin embargo, un análisis de los datos existentes en el Uruguay, muestra la imposibilidad de calcular la ETP mediante la fórmula de Penman en la mayoría de las estaciones meteorológicas del país. Sin embargo, sí es posible calcular la ETP para todo el país a través de la fórmula empírica de Thornthwaite. Dado que Thornthwaite subestima la ETP se procede a comparar en una estación (La Estanzuela) del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), las ETP calculadas por ambos procedimientos en el periodo 1970-1999, observándose que es razonable calcular la ETP de Penman a partir de la ETP de Thornthwaite, multiplicando ésta por un valor de 1.38.

Para la estimación de la ETP en cualquier punto del país, se procede a calcular los ciclos medios en las 13 estaciones meteorológicas del país con datos en el periodo 1970-99, y se adimensionalizaron a partir de su media mensual anual. En estos ciclos se observa una clara coincidencia, por lo que es posible representar el ciclo adimensionalizado, en cualquier punto del territorio, por el ciclo medio de los 13 ciclos anteriores. De esta manera si se conoce la media mensual en un punto, es posible calcular su ciclo medio de ETP, para ello se interpola en el mapa de isolíneas de ETP media mensual de Penman del Uruguay y se multiplica por el ciclo medio adimensionalizado.

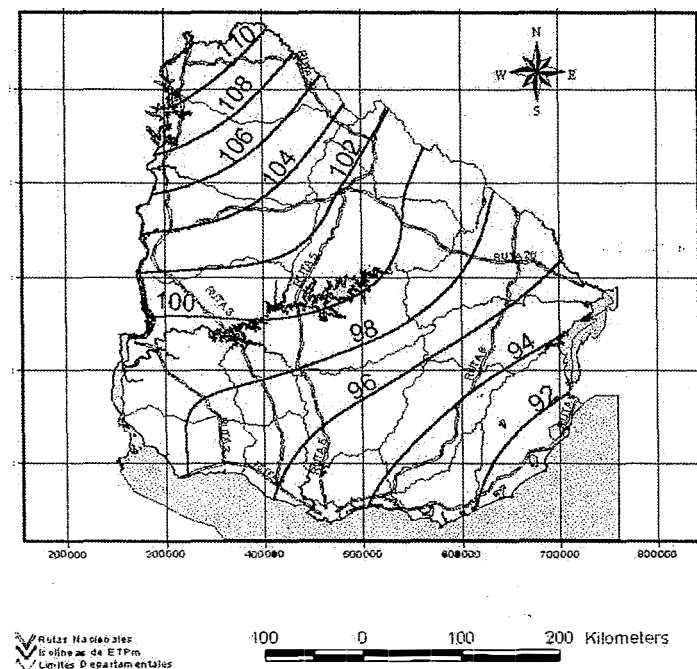


Figura 2.- Isolines de ETP media mensual de Penman.

Tabla 1.- Coeficientes de distribución del ciclo anual de la Evapotranspiración potencial

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1.88	1.56	1.37	0.88	0.58	0.36	0.37	0.47	0.61	0.94	1.25	1.72

Se utiliza el valor de área de las cuencas informado por la DNH, y se comparó los valores que se obtienen del modelo numérico de terreno global SRTM, sin encontrar diferencias significativas entre ambos valores.

Tabla 2.- Cuencas utilizadas en el presente estudio

Estación	Índice de Estación	Período de datos		Latitud	Longitud	Área [Km ²]	AD [mm]	Número Datos
		Inicio	Final					
Arapey	1	1988	1998	31°14'	57°06'	6590	39	117
Cebollatí	2	1987	1999	33°50'	54°46'	2840	72	147
Durazno	3	1970	1999	33°22'	56°31'	8470	90	348
M. Díaz	4	1972	1999	31°32'	55°41'	2100	108	337
Olimar	5	1970	1999	33°15'	54°24'	4540	73	340
P. Cohelo	6	1970	1999	32°02'	55°22'	2300	104	346
P. Pache	7	1970	1999	34°22'	56°15'	4860	126	341
P. Ramos	8	1989	1999	33°33'	58°10'	2110	72	135
Queguay	9	1986	1999	32°08'	57°56'	7530	67	167
S. Carlos	10	1985	1999	34°46'	54°54'	790	108	175
S. José	11	1970	1999	34°19'	56°43'	2290	97	345
Tacuari	12	1985	1999	32°46'	53°45'	3260	72	157

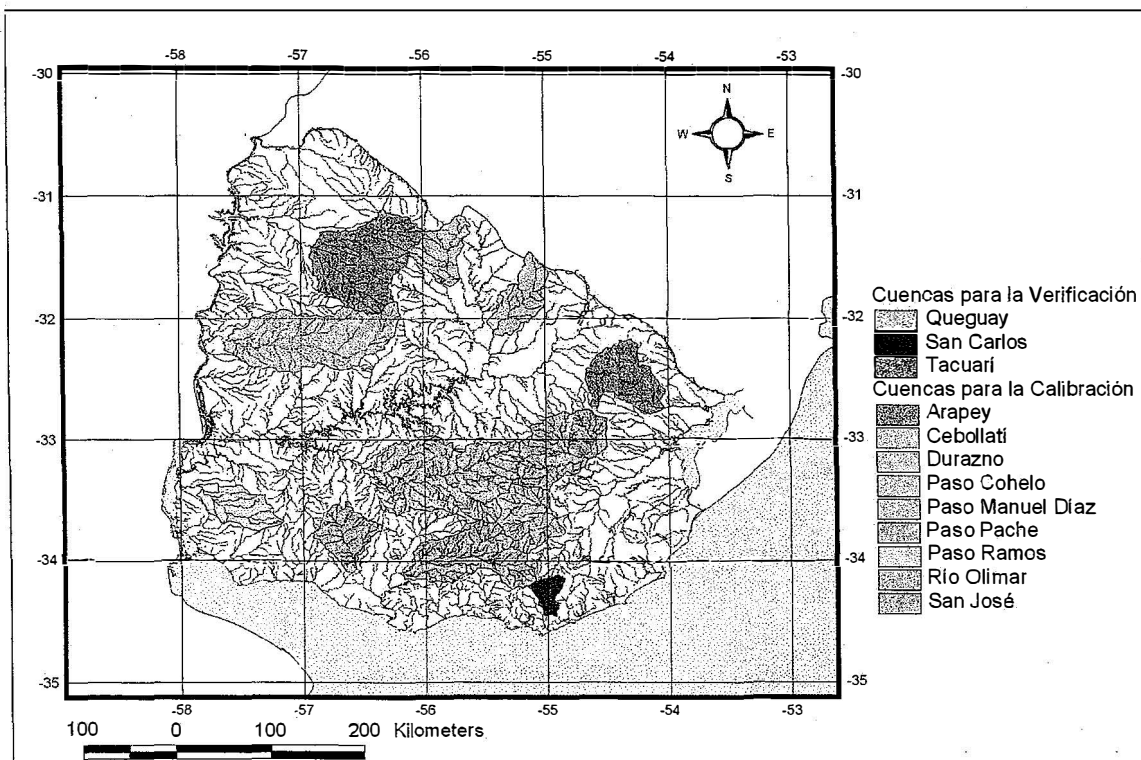


Figura 3.- Distribución espacial de las cuencas utilizadas.

HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN UTILIZADA

El método de optimización empleado en la calibración es el algoritmo genético multiobjetivo MOSCEM-UA, versión en MATLAB®. Los algoritmos genéticos son métodos de optimización y búsqueda inspirados en los mecanismos de evolución de poblaciones de seres vivos. Ellos siguen el principio de selección natural y supervivencia del más apto definido por Charles Darwin. En el inicio del procedimiento se genera aleatoriamente una muestra de puntos separados en el espacio hiperdimensional y a lo largo del procedimiento la muestra de puntos evoluciona en conjunto hasta que los puntos se concentran en una región muy pequeña en la que está localizado el punto óptimo.

De esta manera se presentan dos grandes grupos de soluciones:

- Soluciones dominadas, que considerando todos los objetivos propuestos, serán peores que las otras.
- Soluciones no dominadas o de Pareto óptimas, que al ser comparadas con respecto a todas las restantes, serán mejores en uno o mas objetivos y peores en otro u otros.

El conjunto de soluciones no dominadas es el objetivo principal del abordaje multi-objetivo. Dicho conjunto forma una curva conocida como región de Pareto y es calculada sin establecer una preferencia relativa subjetiva para minimizar (o maximizar) alguna de las funciones objetivo a costa de otras.

El algoritmo se inicia con la definición de límites máximos y mínimos de los valores de los parámetros a ser calibrados. Asimismo se elige el número de complejos Q, el tamaño de la población S y número máximo de evaluaciones de la función (ndraw).

Según el estudio de sensibilidad realizado en el trabajo "Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models" (Vrugt et.al., 2003) el algoritmo es insensible a los valores de Q y S. Se realizó con el presente modelo un estudio de sensibilidad y visualmente se llegó a la conclusión de que es conveniente usar el algoritmo con valores de Q entre 2 y 10, S=1000 y ndraw>10.000.

Además una prueba importante que un método de calibración automática debe superar es la calibración del modelo utilizando una serie sintética de caudales obtenidas con el mismo modelo (Collischonn, 2003). Se realizó la prueba con la cuenca de Olimar generando una serie sintética de caudales con parámetros (CPo, α , $I_{\max}$ y $H_{\max}$) igual a (0.86998, 0.0525, 118.05, 79.923) respectivamente y se obtuvo como resultado de la calibración los valores de los parámetros igual a (0.8665, 0.0529, 120.58, 80.084)

A continuación en la Figura 4 se presenta a modo de ejemplo una grafica de la región de Pareto y marcados con círculo los puntos clasificados como N°1 sobre los cuales se realizan estudios estadísticos.

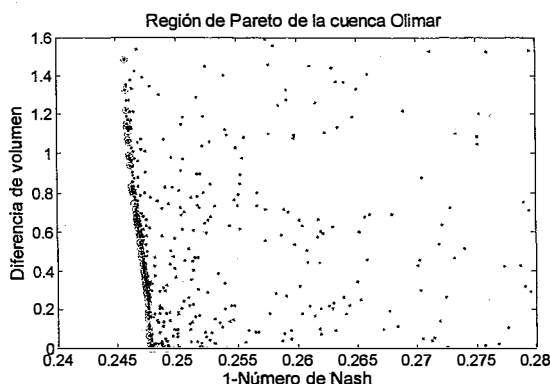


Figura 4.- Región de Pareto (Puntos ranqueados como N° 1 se marcan con círculos).

Se estudio la sensibilidad de las dos funciones objetivos variando los parámetros del modelo en los rangos admisibles y además en la Figura 5 se grafican los valores de las funciones objetivos que logran los puntos de la región de Pareto. Se observa que la función objetivo de Número de Nash es más sensible al $H_{\max}$ y la diferencia de escorrentia es más sensible al CPo y $H_{\max}$.

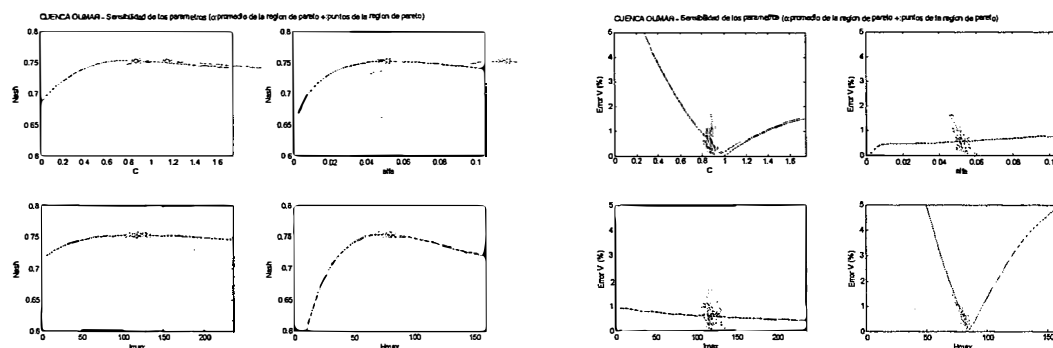


Figura 5.- Sensibilidad de las funciones objetivos variando los parámetros (+ puntos de la región de Pareto).

CALIBRACIÓN DEL MODELO EN URUGUAY

En primer lugar se realiza una calibración individual en las 12 cuencas y luego una regionalización calibrando el modelo en 9 cuencas y verificando en 3.

Calibración Individual: Se realizó para cada cuenca utilizando el algoritmo genético multi-objetivo MOSCEM-UA versión MATLAB® (Q=5, S=1000, ndraw=10,000), con dos funciones objetivos (1-Nash y diferencia de volumen escurrido) y 4 parámetros (CPo, α , $I_{\max}$ y $H_{\max}$) variando entre [0; 2], [0.0; 0.1], [0; 500] y [0; 200] respectivamente. Para la calibración en cada cuenca se buscaron los puntos de la región de Pareto, presentándose en la siguiente tabla los valores medios, máximo, mínimo de los parámetros de dichos puntos. Se presentan además los valores de las funciones objetivo y número de puntos en la región.

Tabla 3.- Valores de los parámetros en la región de Pareto de la calibración individual

Estación	Índice de Estación	CPo	α (día ⁻¹)	I _{max} (mm)	H _{max} (mm)	Dif. Esc (%)	Número de Nash	Puntos Pareto
Arapey	1	1.831 [1.988,1.272]	0.0671 [0.0808,0.0583]	132.3 [167.8,86.6]	37.8 [50.4,34.1]	0.6 [1.5,0]	0.757 [0.759,0.754]	115
Cebollati	2	1.342 [1.499,1.204]	0.0663 [0.0718,0.0613]	482.9 [499.8,434.8]	61.8 [74.5,47]	1.1 [2.6,0]	0.704 [0.708,0.699]	160
Durazno	3	1.007 [1.092,0.942]	0.0828 [0.0899,0.0282]	478.5 [499.5,229.2]	85.0 [94.4,71]	1.0 [2.6,0]	0.672 [0.676,0.627]	117
M.Díaz	4	0.767 [0.989,0.502]	0.0558 [0.0675,0.0465]	488 [499.7,430.4]	134.6 [175.2,93.9]	1.3 [3.5,0.0]	0.713 [0.72,0.704]	132
Olimar	5	1.007 [0.976,0.809]	0.0525 [0.0612,0.0468]	118 [134.5,104]	79.9 [86.3,70.8]	0.6 [1.6,0]	0.753 [0.754,0.751]	64
P. Cohelo	6	1.924 [2.000,1.442]	0.0608 [0.0901,0.0345]	224.5 [356.5,118.0]	68.6 [74.0,64.9]	0.2 [0.7,0.0]	0.671 [0.674,0.667]	14
P. Pache	7	1.504 [1.997,0.484]	0.0489 [0.0963,0.0225]	296.6 [498.6,133.2]	78.1 [135.9,46.5]	2.0 [4.8,0.0]	0.622 [0.639,0.597]	44
P.Ramos	8	0.421 [1.567,0.016]	0.0541 [0.0687,0.0302]	383.4 [495.0,286.4]	152.6 [200.0,44.4]	2.0 [5.6,0.0]	0.523 [0.534,0.494]	24
Queguay	9	1.747 [1.965,1.178]	0.0632 [0.0805,0.027]	326.8 [485.5,190.2]	120.9 [133.8,113.2]	0.4 [1.1,0.0]	0.712 [0.73,0.656]	12
S. Carlos	10	1.413 [1.835,1.087]	0.0148 [0.0314,0.0017]	77 [142.2,32.1]	59.8 [80.4,40.8]	1.4 [3.7,0.0]	0.609 [0.615,0.589]	10
S. José	11	0.362 [0.486,0.238]	0.0924 [0.0987,0.0845]	429.1 [498.8,330.3]	199.7 [200.0,196.6]	0.6 [1.7,0.0]	0.687 [0.691,0.68]	105
Tacuari	12	0.529 [1.536,0.368]	0.076 [0.0906,0.0004]	444.2 [499.5,28.0]	176.9 [199.9,108.1]	2.9 [5.2,0.0]	0.679 [0.686,0.657]	40

A continuación se presenta como ejemplo los hidrogramas medido y calculados para todos los puntos de la región de Pareto (64 hidrogramas) para la cuenca de Olimar.

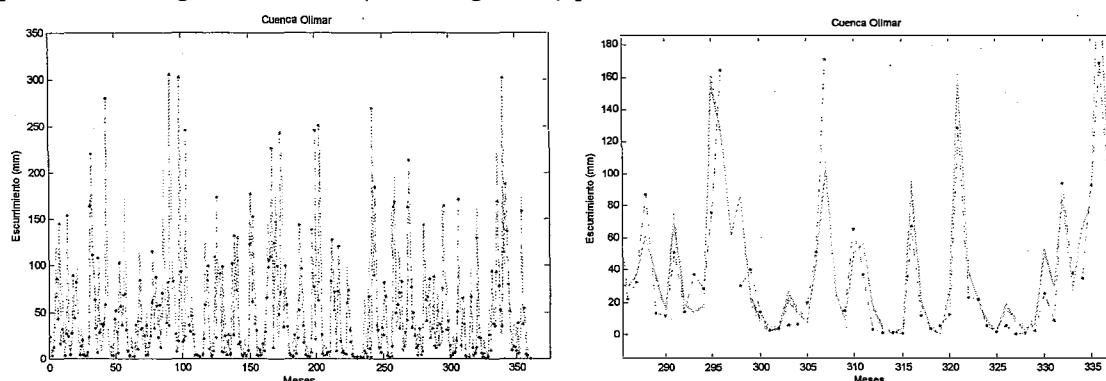


Figura 6.- Hidrograma medido (línea punteada) e hidrogramas calculados para cada punto de la región de Pareto (64) en la Cuenca Olimar con 340 meses de datos. Total de meses y detalle.

Calibración regional: Las calibraciones individuales son válidas para la aplicación en la respectiva cuenca, no obstante dado que el objetivo es disponer de una relación precipitación escurrimiento en cualquier cuenca del país, se considera recalibrar las cuencas regionalizando los parámetros (Fernández, 2000). En la precipitación y en la evapotranspiración ya están consideradas las variaciones espaciales, por lo que resta tomar en cuenta las variaciones en el comportamiento de las capas de suelo entre las diferentes cuencas. La capa superior se asocia a los suelos superficiales (suelo vegetal), que han sido clasificados según la profundidad y tipo de suelo en la Carta de Suelos del Uruguay (MGAP, 1976). La División de Suelos y Aguas del MGAP caracterizó dichos suelos según el parámetro de almacenamiento “Agua Disponible” (Molfino-Califra, 2001).

A partir del estudio de sensibilidad mencionado anteriormente se decide considerar un valor único para todo el país en los parámetros CPo, I_{max} y α .

El parámetro H_{max} representa, en el modelo de Temez, la capacidad máxima de retención de agua del suelo al final de cada mes, dada la definición de “Agua Disponible” se optó por proponer una relación proporcional con dicho parámetro:

$$H_{\max} = CH_{\max} \cdot AD$$

[11]

La calibración regional se realiza utilizando el algoritmo genético multi-objetivo MOSCEM-UA versión MATLAB® (Q=5,S=1000,ndraw=10,000), con 18 funciones objetivo (1-Número de Nash y diferencia de volumen escurrido) para cada una de las 9 cuencas usadas en la calibración, y 4 parámetros; CPo, α , Imax y CHmax (estimándose el parámetro Hmax del modelo como Hmax=AD. CHmax). Los parámetros varían entre [0;2], [0.0;0.1], [0;500] y [0;3] respectivamente.

Tabla 4.- Valores de los parámetros en la región de Pareto de la calibración regional

	Número de Nash			Diferencia de volumen escurrido (%)		
	Promedio	Máxima	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
Arapey	0.753	0.745	0.757	3.2	5.2	1.8
Cebollati	0.693	0.685	0.705	-0.9	2.1	0.0
Durazno	0.666	0.661	0.672	0.8	2.0	0.1
M.Díaz	0.677	0.669	0.694	2.5	3.7	1.6
Olimar	0.744	0.741	0.746	0.8	1.9	0.1
P. Cohelo	0.661	0.654	0.668	1.4	2.5	0.0
P. Pache	0.558	0.492	0.612	1.3	1.9	0.7
P.Ramos	0.501	0.493	0.516	2.2	3.6	1.2
S. José	0.630	0.606	0.638	5.6	7.0	4.5

Tabla 5.- Valores de los parámetros en la región de Pareto de la calibración regional

	Promedio	Maximo	Minimo
C	1.499	1.855	1.303
alfa	0.0781	0.0933	0.0648
Imax	334.3	404.7	250.0
CHmax	0.85	0.99	0.66

Tabla 6.- Valores de los parámetros en la región de Pareto de la calibración regional

Cuenca	Número de Nash		Diferencia de volumen escurrido (%)	
	Regional	Individual	Regional	Individual
Queguay	0.678 [0.676,0.655]	0.712 [0.73,0.656]	5.900 [4.188,8.762]	0.4 [1.1,0.0]
S. Carlos	0.563 [0.538,0.589]	0.609 [0.615,0.589]	5.236 [2.763,0.557]	1.4 [3.7,0.0]
Tacuari	0.685 [0.629,0.628]	0.679 [0.686,0.657]	2.079 [7.998,11.317]	2.9 [5.2,0.0]

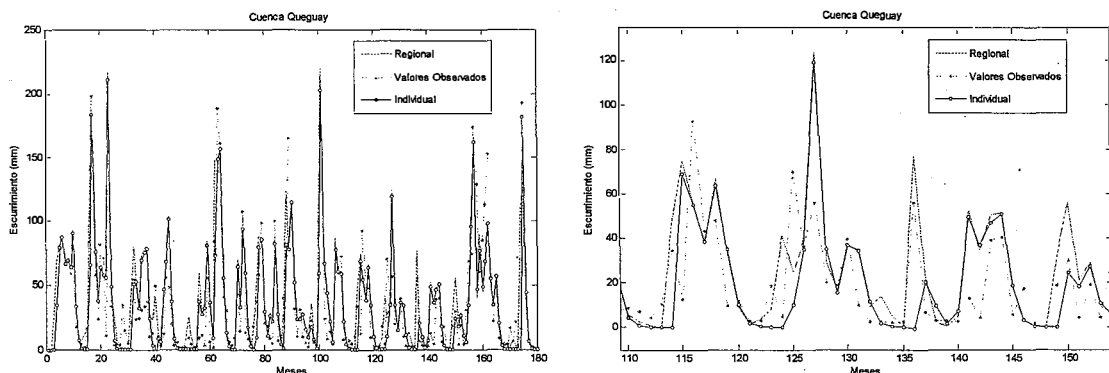


Figura 7.- Hidrograma medido (línea punteada) e hidrogramas calculados para cada punto de la región de Pareto (64) en la Cuenca Olimar con 340 meses de datos. Total de meses y detalle.

CONCLUSIONES Y DISCUSION

Se ha logrado calibrar regionalmente en forma automática los parámetros de un modelo de balance hídrico mensual considerando dos funciones objetivos.

Cuando se estima la escurrentía mensual para diferentes valores de los parámetros de la región de Pareto se observa cierta incertidumbre en la escurrentía inferior (Ver figura 5), lo que indicaría que se podría agregar otra función objetivo para mejorar la calibración.

La pérdida en los valores de las funciones objetivos cuando se pasa de valores de parámetros de calibración individual a regional no es significativa (solo se observa en 3 cuencas de calibración y 2 cuencas de verificación).

Se puede concluir que se dispone de una herramienta que genera información de escurrimiento superficial para todo el país lo que permite gestionar los Recursos Hídricos en el Uruguay. En combinación con un modelo digital del terreno es posible determinar en cualquier cuenca del país, el volumen de escurrimiento medio, para una gestión simple, o las series de escurrimientos mensuales, que se utilizan como datos de entrada para modelos más complejos de gestión como el Mike Basin o el Aquarius.

Asimismo se dispone de otra herramienta (algoritmo genético multi-objetivo MOSCEM-UA) que permite encontrar soluciones a objetivos contrarios o conflictivos en la gestión creciente de los Recursos Hídricos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al apoyo e información que suministró Walter Collischonn y a las autoridades y profesionales de la Dirección Nacional de Hidrografía, la Dirección Nacional de Meteorología y la Dirección de Suelos y Aguas por la información suministrada.

Referencias Bibliográficas

- Collischonn, W., Tucci, C. E., (2003). "Calibración Multi-objetivo de un modelo hidrológico utilizando un algoritmo genético", Revista de la ABRH.
- Fernandez W., R.M. Vogel, & A. Sankarasubramanian (2000). "Regional Calibration of a Watershed Model" Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 45(5), 689-707.
- IMFIA-DNH-PHI-UNESCO (2002). "Balances Hídricos superficiales del Uruguay".
- MGAP, Dirección de Suelos y Aguas (1976); "Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000".
- Molfino J.H.; Califra A. (2001). "Agua Disponible de las Tierras del Uruguay", División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.
- Temez J.R.(1977). "Modelo matemático de transferencia precipitación aportación". *ASINEL* 1977.
- Vrugt Jasper A., Hoshin V. Gupta, Luis A. Bastidas, Willem Bouten & Soroosh Sorooshian (2003). "Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models", Water Resources Research, Vol. 39, No. 8.

EL RIEGO POR PÍVOT, SU TECNOLOGÍA Y COSTOS

Ing. Agr. Gabriel Baccino Giannetto

E-mail: hg2adinet.com.uy

Introducción

El riego por pivot central es una tecnología que ha sido desarrollada a partir de la década del 50, en Nebraska, Estados Unidos; en 1968 se fabrica el primer sistema de riego reversible de transmisión eléctrica.

Actualmente su uso está muy difundido a nivel mundial, fundamentalmente para el riego de cultivos y forrajeras. A mediados de la década del 90, se comienzan a instalar en nuestro país, totalizando a la fecha, no más de una veintena de equipos, para el riego de cultivos como maíz y soja fundamentalmente.

El sistema de riego, el método, las ventajas, desventajas, el análisis de casos con la descripción de los equipos, los costos de inversión y operativos, tiene como objetivo el presente desarrollo.

Componentes del sistema por Pívot Central

Las unidades básicas que componen el sistema de riego por pivot son: el grupo de bombeo, el grupo de suministro de energía eléctrica, las tuberías de conducción en PVC ó aluminio con sus hidrantes, y un ramal de riego con sus emisores y reguladores de presión.

Por lo general, son sistemas semifijos, siendo la toma de agua y el abastecimiento de energía fijas, al igual que la tubería e hidrantes, siendo móvil el ramal de riego.

La máquina de riego se compone de un centro pivot, los tramos de tuberías con sus torres de desplazamiento mediante ruedas, y los emisores. El centro pivot sobre el que gira, puede estar fijo al terreno en un punto, ó puede ser remolcable, en aquellas máquinas que se desplazan a diferentes puntos.

El método de riego por Pívot Central

El riego por pivot, implica aplicar una lluvia controlada, más o menos intensa y uniforme, sobre la parcela con el objetivo de que el agua, infiltre en el mismo punto donde cae. Es un sistema de desplazamiento continuo mientras se realiza la aplicación del agua.

Por estar muy ligado a la parcela, es muy adecuado para la aplicación de grandes cantidades de agua, durante la estación de desarrollo del cultivo.

Este sistema permite el riego nocturno, cuando hay menor evaporación, velocidad del viento y costo energético.

Por ser un riego de alta frecuencia, la uniformidad se compensa en los sucesivos riegos, al ir cambiando la dirección del viento.

En el proceso de aplicación, el agua que se difunde por el aire en un conjunto de gotas, que se distribuyen sobre la superficie del terreno, con la pretensión de conseguir una distribución uniforme entre varios emisores.

La pluviosidad que recibe un punto del terreno, esta determinada por la presión en la boquilla, el diámetro del orificio de salida del emisor, la distancia y ubicación de estos, y la velocidad de avance.

Los efectos derivados de esta aplicación son:

- producción de escorrentía, cuando la velocidad de aplicación (pluviosidad del sistema) es mayor a la infiltración de agua del suelo.
- el posible deterioro de la superficie del terreno por la escorrentía, formando costra y erosión.
- la redistribución del agua dentro del suelo por diferencias de potencial hidráulico, mejora sensiblemente la uniformidad real del agua en el suelo.

Ventajas del sistema de riego por Pívot Central

- es relativamente sencillo diseñar un sistema que satisfaga la demanda pico del cultivo, sin causar un impacto significativo en el costo de la inversión.
- el control del riego solo está limitado por las condiciones atmosféricas (perdidas por evaporación y efecto del viento sobre la uniformidad)
- la uniformidad es independiente de las características hidrofísicas del suelo.
- la alta eficiencia de aplicación reduce el volumen de agua durante el ciclo del cultivo, hay autores que indican valores de coeficiente de uniformidad de 94%
- se logran altos grados de automatización, con el consiguiente ahorro de mano de obra, agua y energía
- la dosis de riego únicamente es función del tiempo, se adaptan muy bien tanto a dosis grandes o pequeñas
- se adapta bien a terrenos con diferentes permeabilidades, ya que dosifica en forma rigurosa

- permite la aplicación de fertilizantes mediante la inyección, con muy buena uniformidad y eficiencia
- se adapta a la rotación de cultivos y a riegos estratégicos
- no requiere nivelaciones, adaptándose a topografías onduladas
- en el interior de las parcelas no requiere de sistematización especial, adicional a la requerida para la conservación del suelo, lo que permite una buena mecanización
- se maximiza el uso de la tierra dentro de la parcela, al no requerir canales, acequias, calles de trineos, etc

Desventajas del sistema de riego por Pívor Central

- requiere altas inversiones iniciales, los costos de operación y mantenimiento son intermedios, respecto al sistema de cañón ó gravedad.
- requiere mayor presión de funcionamiento, si lo comparamos con riego por gravedad
- elevada pluviometría en el extremo del ramal, por ej. en un lateral de 400 metros, los últimos 54 metros riegan el 25% del área
- interfiere con los tratamientos fitosanitarios
- el efecto del mojado de las hojas sobre las plagas y enfermedades

Análisis de casos

A los efectos de observar como incide la fuente de agua y la energía, en la inversión y los costos operativos, se presentan dos casos.

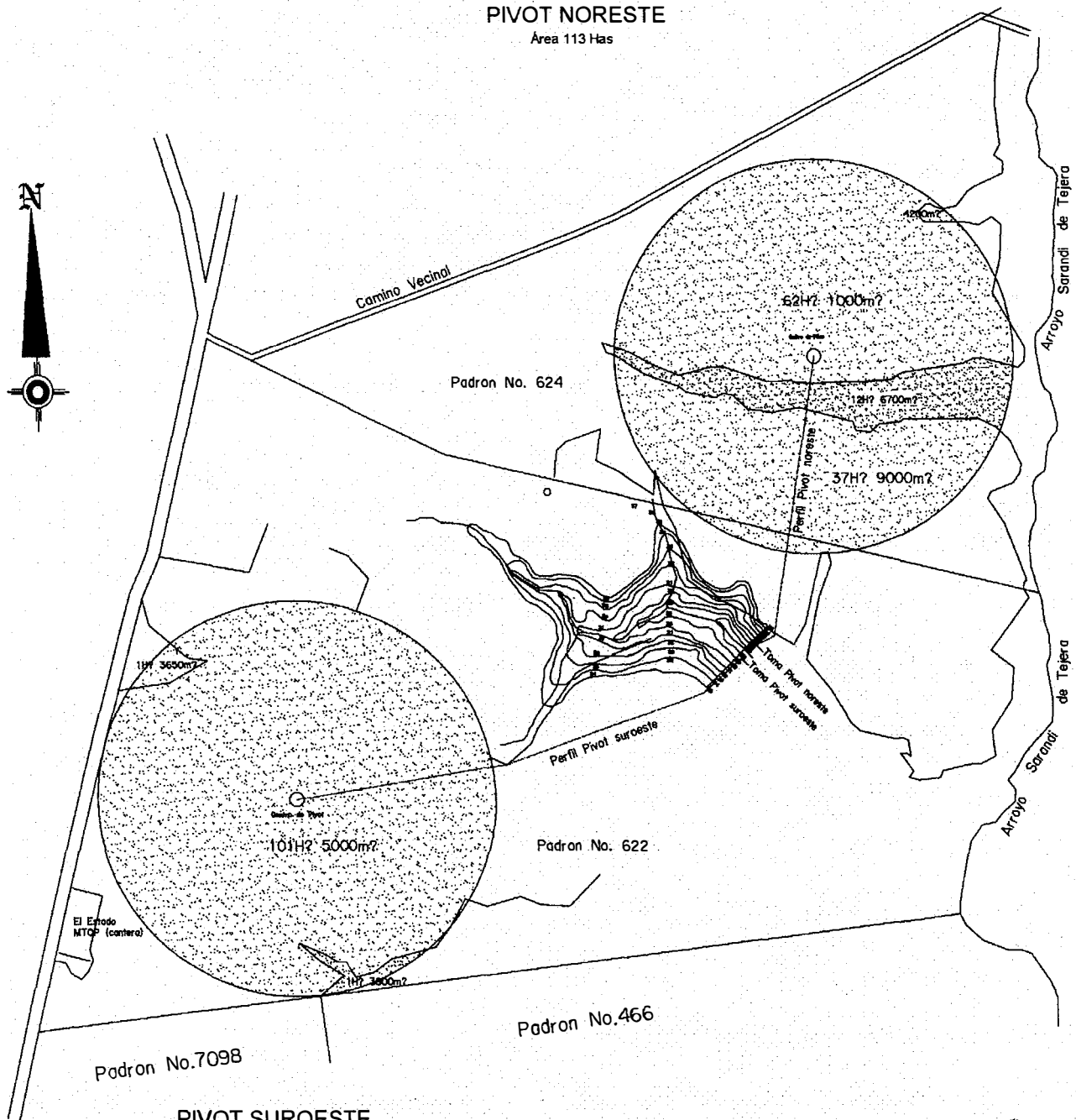
Proyecto de riego por Pívor Central y Represa

Agroindustrias Uruguay SA

Cultivos	maíz – soja - pastura	
Requerimiento promedio enero	6,7 mm/día (7,9 mm x 0,7 Ktan x 1,2 kc)	
Requerimiento punta	9,4 mm/día (10 mm x 0,7 Ktan x 1,2 kc)	
Suelos	Grupo Coneat 10.2 Limo arcillosos, con arena del cretácico Vertisoles Rupticos Lúvicos Brunosoles Eutricos y Subéutricos Lúvicos	
Velocidad de infiltración del suelo (a los efectos del diseño)	12	mm/hora
Área de riego	226	has
Nº de círculos	2	
Superficie del círculo	113	has
Tiempo máximo de riego	20	horas
Caudal de bombeo	670	m3/hora
Lámina de riego	6	mm/día
Tubería Sur	1.431	metros
Altura geométrica Sur	20	metros
Desnivel máximo en 400 metros	8	metros
Tubería Norte	924	metros
Altura geométrica Norte	11	metros
Desnivel máximo en 600 metros	9	metros
Represa chica	607.287	m3
Agua útil	507.167	m3
Lámina suplementaria	2.243	m3/estación (224 mm)
Área inundada	21	has
Eficiencia agua-tierra	23:1	
Volumen de tierra del terraplén	26.046	m3 (28.379 m3)

PIVOT NORESTE

Área 113 Has



ESCALA 1:15000



Equipos de riego

Conformados por los siguientes ítems:

- 2 succiones de 10" en hierro con acoples y uniones flexibles
- 2 grupos de bombeo, con bombas centrífugas Cornell para un caudal de 335 m³/hora y una presión 6 y 6,8 kg/cm², una eficiencia de 82%, una potencia al eje de 91 y 103 Hp. Motores Jhon Deere con 105 y 118 Hp en servicio continuo a 1.600 y 1.800 rpm respectivamente. Montados sobre base.
- 2 descargas en hierro, con válvula de retención, llave de guillotina y elementos de medida y seguridad
- 2.355 metros de tubería de PVC de 250 mm clase 6, con sus accesorios de montaje
- 9 válvulas de aire de 3" de doble efecto cinéticas con elementos de montaje
- 1 válvula de sobre presión de 3" con elemento de montaje
- 4 llaves coliza de 4" para drenaje con elementos de montaje
- 3 válvulas de retención con elementos de montaje
- 2 codos hidrante
- 2 cabeza de hidrante y mangón flexible de 8"
- 2 casetas de bombeo
- 7 dados de hormigón
- 2 bases y anclajes para los centros pivot
- 2 pivot fijos de 11 torres de 8" y 6 5/8", con una longitud estructural de 600 metros, bajantes flexibles, tablero básico, moto reductores de alta velocidad, cubiertas de alta flotación y rotores S 3000 de ángulo bajo de 9 estrías y regulador de presión
- 2 moto generador de 15 KVA – 380 v – 50 hz., sobre trailer, con tablero de control y cable de conexión

Costos del proyecto

1.1 Costos de inversión

Represa	U\$S	53.250
Equipos de riego *	U\$S	426.000
Total del proyecto	U\$S	479.250
Total / ha	U\$S	2.120

* Incluye obras, suministros, montaje e instalación y honorarios del proyecto.

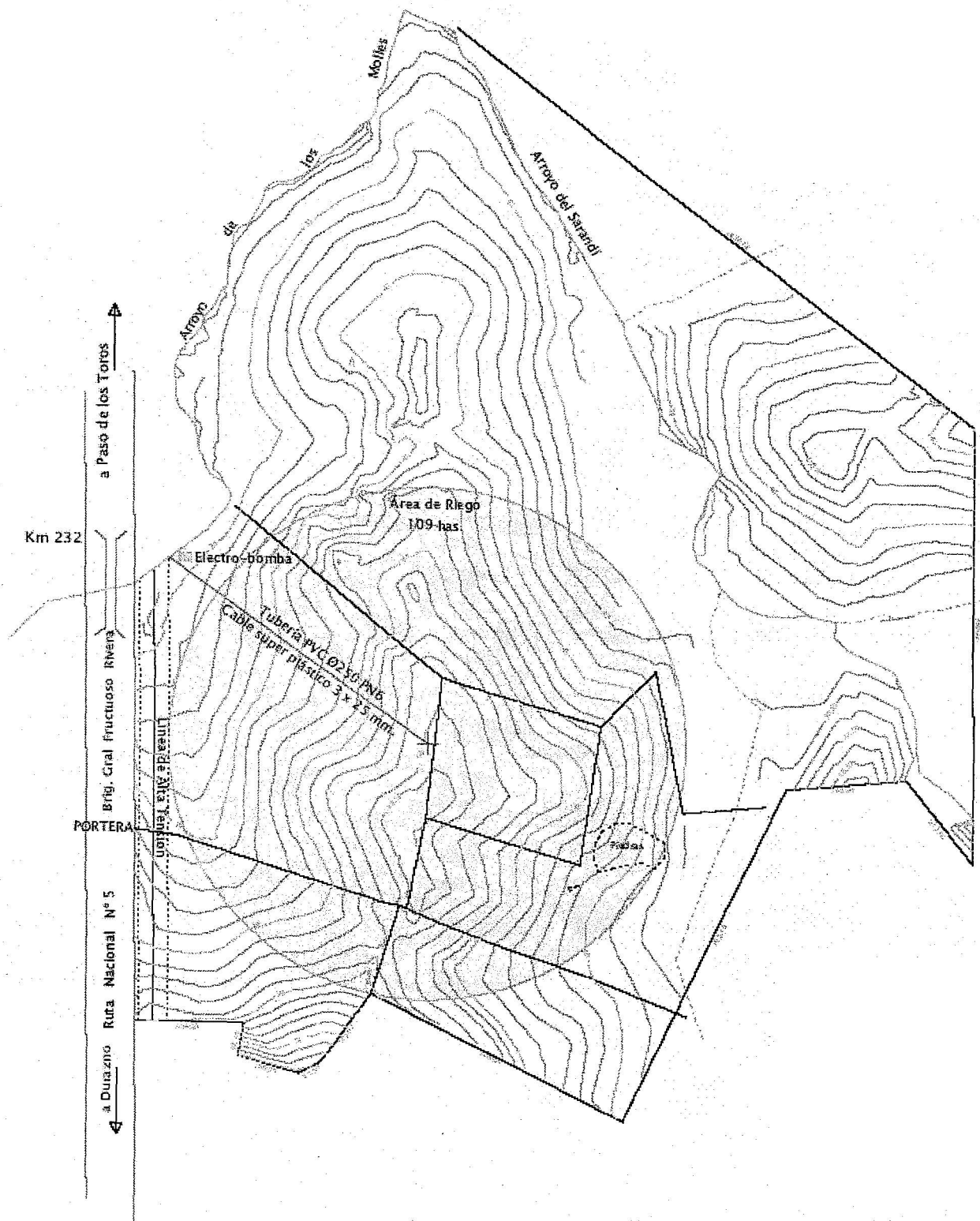
1.2 Costo operativos

	Pivot Norte U\$S/mm	Pivot Sur U\$S/mm
Energía	0,63	0,72
M. de obra	0,05	0,05
Total	0,68	0,77

Proyecto de riego por Pívor Central con toma

Hidromundo SRL

Cultivo	Pasturas
Requerimiento promedio enero	6 mm/día
Suelos	Grupos Coneat 12.13 – 12.22 Limo arcillosos Brunosoles Eutricos Melánicos y Vertisoles
Velocidad de infiltración del suelo	10 mm/hora
Área de riego	109 has
Nº de círculos	1
Superficie del círculo	109 has
Tiempo de riego	18 horas
Caudal de bombeo	250 m ³ /hora
Lámina de riego	4 mm/día (suplementario)
Tubería	710 metros
Altura geométrica Sur	15 metros
Desnivel máximo en 590 metros	2 metros



Equipo de riego

Conformado por los siguientes ítems:

- 1 succión de 10" en hierro con acoples y uniones flexibles
- 1 grupo de electro bomba, con bomba centrífuga Ideal para un caudal de 250 m³/hora y una presión 6 kg/cm², una eficiencia de 78%, una potencia al eje de 70 Hp, motor Eberle 100 hp y 2.850 rpm. Montado sobre base.
- 1 comando de arranque progresivo y accesorios, montado en armario.
- 1 descarga de 8" en hierro, con válvula de retención, llave de guillotina y elementos de medida y seguridad
- 710 metros de tubería de PVC de 250 mm clase 6, con sus accesorios de montaje
- 3 válvulas de aire de 3" de doble efecto cinéticas con elementos de montaje
- 1 válvula de sobre presión de 2" con elemento de montaje
- 1 llaves coliza de 4" para drenaje con elementos de montaje
- 1 válvula de retención con elementos de montaje
- 1 codo hidrante
- 1 cabeza de hidrante y mangón flexible de 8"
- 1 casetas de bombeo
- 3 dados de hormigón
- 1 bases y anclajes para los centros pivot
- 1 pivot fijos de 11 torres de 8" y 6 5/8", con una longitud estructural de 570 metros, bajantes flexibles, tablero básico, moto reductores de alta velocidad, cubiertas de alta flotación y rotores S 3000 de ángulo bajo de 9 estrías y regulador de presión
- 720 metros de cable súper plástico de 3 x 25 mm

Costos del proyecto

1.1 Costos de inversión

Equipo de riego *	U\$S	185.000
Total del proyecto	U\$S	185.000
Total / ha	U\$S	1.700

* Incluye obras, suministros, montaje e instalación y honorarios del proyecto.

1.2 Costo operativos

	18 horas bombeo U\$S/mm	24 horas de bombeo U\$S/mm
Energía	0,30	0,36
M. de obra	0,05	0,05
Total	0,35	0,41

Consideraciones finales

La adopción de la tecnología del riego por Pívor Central, otorga estabilidad y aumento de rendimiento a los sistemas de producción, solamente se logra cuando a nivel de parcela la tecnología de secano está muy bien aplicada, lo que permitirá expresar su beneficio.

Las ventajas y desventajas de los sistemas de riego por Pívor Central, se deben analizar en base a la relación costo-beneficio. En relación con todos los componentes del proyecto de riego, fuente de agua, energía, ubicación de las áreas de riego, mano de obra y calidad de los suelos a regar.

Efecto de la interacción sistema de laboreo por fecha de siembra en el rendimiento en grano de maíz y soja

Mario Pérez Bidegain

23 de julio de 2007

La temperatura y contenido de agua en el suelo pueden ser afectadas por el sistema de laboreo empleado al momento de la siembra. Si existiera interacción sistema de laboreo por fecha de siembra, sembrar un cultivo en un mismo día, como en la mayoría de los ensayos, podría sesgar los resultados. El objetivo de este estudio fue comparar el rendimiento en grano de maíz y soja sembrados con laboreo convencional (cincel), strip tillage (laboreo en fajas) y siembra directa, cuando la elección de la fecha de siembra fue seleccionada de acuerdo a la temperatura y humedad del suelo dentro de cada sistema de laboreo. Durante tres años (2002-2004) se realizaron dos ensayos (uno de maíz y otro de soja) en Iowa, Estados Unidos. El diseño experimental utilizado fue de parcelas divididas, en donde los tratamientos de laboreo fueron aleatorizados en parcelas grandes en cuatro bloques. Ambos cultivos fueron sembrados con los tres laboreos en tres fechas de siembra en las parcelas chicas. El criterio para determinar la fecha de siembra fue temperatura del suelo ($> 10^{\circ}\text{C}$ maíz y $> 13^{\circ}\text{C}$ soja) y el contenido de agua en el suelo igual o menor al límite inferior de plasticidad a una profundidad de 0.05 m. La fecha de siembra ocurrió en cada tratamiento de laboreo cuando se alcanzó el criterio mencionado anteriormente. En ambos cultivos, la fecha de siembra más temprana ocurrió simultáneamente en laboreo convencional y strip tillage. La siembra directa alcanzó el criterio empleado entre 4 y 28 días, y entre 6 y 15 días después, en maíz y soja, respectivamente, que en los otros dos laboreos. El maíz sembrado con laboreo convencional rindió 0.8 Mg ha^{-1} más que la media de los otros dos laboreos, promedio de los tres años que duró el experimento. La fecha de siembra afectó el rendimiento de maíz en el año 2003. La soja plantada en la fecha de siembra más temprana rindió 0.16 Mg ha^{-1} más que la media de las otras dos fechas de siembra, promedio de los tres años que duró el experimento. No fue detectada interacción laboreo por fecha de siembra en rendimiento en grano en ambos cultivos. Los resultados de este trabajo sugieren que la elección de una fecha de siembra común para diferentes laboreos es válida.

Perez-Bidegain, M., Cruse, R.M. y A. Ciha. 2007. Tillage System by Planting Date Interaction Effects on Corn and Soybean Yield. *Agron. J.* 99:630-636.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL RIEGO POR SUPERFICIE

Ing. Agr. Mario García

Unidad de Hidrología – G. D. Ingeniería Agrícola – Departamento de Suelos y Aguas

I. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE RIEGO POR SUPERFICIE

Introducción

El método se conoce como Riego por Superficie o Riego por Gravedad

A diferencia de los métodos a presión, al avanzar el agua sobre la superficie del suelo se produce simultáneamente la distribución del agua en la parcela y la infiltración de la misma en el perfil del suelo.

Este hecho plantea problemas teóricos de gran complejidad para el diseño de los sistemas.

La única energía que mueve el agua es la de posición o gravitacional.

Tipos de riego por superficie

Riego por inundación (basin, sumersión)

Riego por melgas (border, a manta, tablares, amelgas, fajas, bordes, desbordamiento, por lámina)

Riego por surcos (furrow)

Riego por inundación

Áreas planas, superficies niveladas, rodeadas por bordos.

En Uruguay este método se utiliza exclusivamente para el cultivo del arroz y los bordos (taipas) son en contorno.

Riego por melgas

Similar al riego por inundación, pero con salida libre de agua en el extremo inferior.

Superficies rectangulares o en contorno.

Con pendiente longitudinal, pero sin pendiente transversal

El agua avanza sobre toda la superficie de la melga

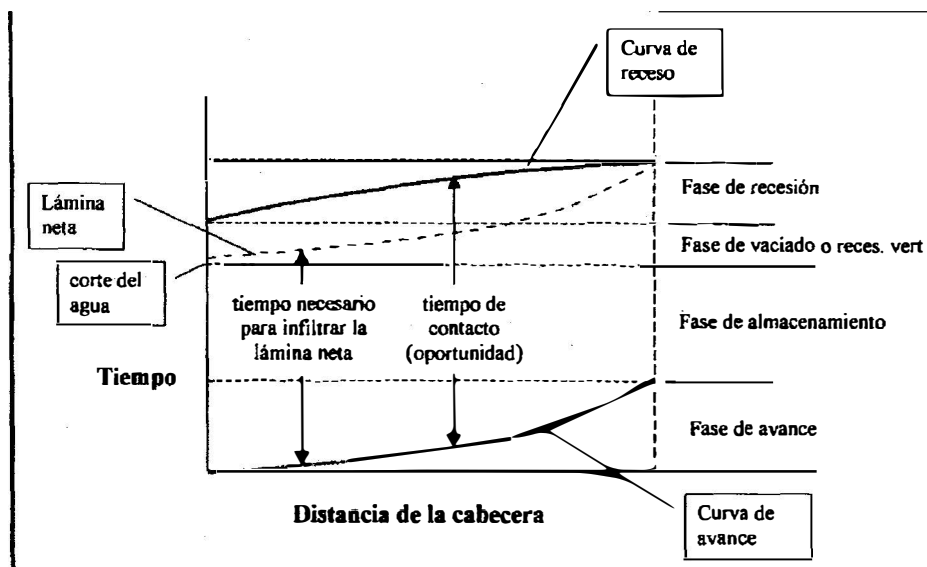
Riego por surcos

No moja toda la superficie (puede ser un riego localizado)

Se construyen pequeños canales (surcos) que conducirán el movimiento del agua

El agua infiltra a través del perímetro mojado

Hidráulica del riego por superficie



Riego por surcos

Cultivos en línea, papas, maíz (laboreo convencional)

Sistematización para riego por surcos

1. Terrenos con baja pendiente ($<1.5\%$)

Regueras a nivel
Surcos en la máxima pendiente

2. Terrenos con alta pendiente ($>2.5\%$)

Regueras entubadas en la máxima pendiente
Surcos en contorno con pendiente controlada ($<1.5\%$)

Aducción de agua a los surcos

1. Terrenos con baja pendiente ($<1.5\%$)

Directa (desde la acequia)
Contra-acequia (acequia auxiliar)
Tubos a través de la pared
Sifones
Tuberías de gran diámetro, con compuertas

2. Terrenos con alta pendiente ($>2.5\%$)

Tuberías de pequeño diámetro (50, 63, 75 mm) perforadas, orificios regulables

Riego por melgas

Cultivos densos, cultivos en siembra directa, cereales de verano, forrajeras

Pendiente longitudinal en un solo sentido

Se aplica el agua en la cabecera y avanza, infiltrando

Objetivo – Aportar la lámina neta deseada de manera uniforme en toda la melga. Para eso, el tiempo de contacto debe ser similar en toda la melga y no menor al tiempo de oportunidad.

Condiciones – El volumen de agua aportado a la melga es igual a la Lámina Bruta. El tiempo de contacto en cabecera es igual al tiempo necesario para infiltrar la lámina neta de riego.

Sistematización para riego por melgas

1. Terrenos con baja pendiente (<1.5%)

Regueras a nivel

Melgas largas, limitadas por bordos

Lámina escurre en la máxima pendiente

2. Terrenos con alta pendiente (>2.5%)

Regueras principales en la máxima pendiente ¿entubadas?

Regueras auxiliares a nivel

Melgas cortas, sin bordos

Lámina escurre en la máxima pendiente

II. COMPARACIÓN DEL RIEGO POR SUPERFICIE CON LOS MÉTODOS DE RIEGO A PRESIÓN

Uso del recurso	Riego por superficie	Riegos a presión
Agua	Ea muy variable	Ea muy variable
Energía (costo operativo)	Nada a bajo	Alto a muy alto
Capital (costo inversión)	Bajo a medio	Alto a muy alto
Mano de obra	Bajo a muy alto	Bajo a muy bajo
Capacidad técnica	Alto	Bajo

III. HIPÓTESIS DE FUTURO (A DISCUTIR)

1. Con los actuales precios de la tierra, de los insumos y de los productos agropecuarios, la inclusión del riego en los sistemas de producción agrícola, agrícola- ganadero y lechero es rentable para el productor.
2. El aumento en cantidad y calidad de la producción agropecuaria por efecto de la inclusión del riego (junto con las demás prácticas de manejo) es de interés del gobierno para el desarrollo de un país productivo con justicia social.
3. Los recursos más limitantes en nuestro país son la energía y el capital.
El riego por superficie, por ser el que demanda un menos uso de estos recursos limitantes, será el método de riego más apropiado para la mayoría de las situaciones de producción.
4. La inclusión del riego en los sistemas de producción de ninguna manera supone agregar una actividad más a lo que ya se está haciendo, sino que implica repensar el funcionamiento de todo el sistema.
5. Las mayores limitantes para la inclusión masiva del riego por superficie en los sistemas de producción agropecuaria son tecnológicas:
 - Falta de formación de los técnicos para la sistematización de los predios y el diseño de los sistemas
 - Falta de personal con entrenamiento
 - Falta de investigación nacional en:
 - Qué regar (especies y mezclas)
 - Cuánto regar (funciones de respuesta, Etc)
 - Cómo manejar el sistema en su totalidad
 - Tecnología del riego (sistematización, conducción, aducción, caudal(es), tiempos, largos, anchos,.....)

"Análisis del impacto del riego y otras prácticas agronómicas en la frecuencia de rendimientos de maíz en el largo plazo"

Material guía de la exposición en Seminario Viernes 27 julio 2007.- Paysandú.-

Guillermo Cardellino (Agroterra S.A.)

Walter E. Baethgen (IRI-Universidad de Columbia)

1.-Introducción

Dadas las características del clima del Uruguay, el riego ha sido considerado como una alternativa tecnológica en la búsqueda de mejoras de los niveles de rentabilidad y estabilidad de los ingresos en los sistemas agrícolas ganaderos. Sin embargo a pesar de haberse desarrollado una cierta infraestructura de fuentes de agua como para atender un área del orden de 5.000 ha de maíz (Prenader), el área efectivamente bajo riego es de escasa significación.

La coyuntura económica de comienzos de los años 2000 ha limitado la capacidad de inversión en equipamiento para completar la infraestructura básica.

Tampoco se generaron las capacidades de gestión de los productores ni de técnicos y operarios como para poder llevar adelante la implementación del riego a nivel predial.

El escaso desarrollo del riego está también relacionado a los cambios registrados en la estructura de la producción agrícola en los últimos años, marcados por un impactante crecimiento del área de soja, los cambios en la propiedad de la tierra así como en las formas de realizar la agricultura.

A excepción de los últimos años los precios del maíz tampoco han sido favorables como para promover inversiones en riego, ya que las diferencias esperadas en rinde no resultaban atractivas económicamente.

De hecho los buenos productores agrícolas de secano, en siembra directa y manejando rotaciones que incluyen maíz sin riego, han logrado resultados económicos razonables sin incursionar en una técnica que implica una complejidad operativa no siempre compatible con la gestión de las empresas actuales.

Hoy día los cambios en los incrementos en los precios del maíz así como los cambios en las formas de tributación marcan un escenario más favorable como para considerar el riego.

La adopción del riego en sistemas agrícolas ganaderos requiere de un análisis en profundidad del impacto que la tecnología produce en los ingresos netos del predio en el largo plazo, considerando las limitantes que se deben sortear en el manejo agronómico de suelos y cultivos y los ajustes que se deben verificar en la operativa y gestión general de las empresas.

Los pocos proyectos que se han implementado con resultados exitosos, reúnen la condición de haber logrado armonizar el potencial que ofrecen los recursos naturales disponibles en los predios para el desarrollo del riego y para la obtención de altos

niveles de producción de los cultivos con niveles de inversión y costos operativos acordes a las expectativas razonables de ingresos

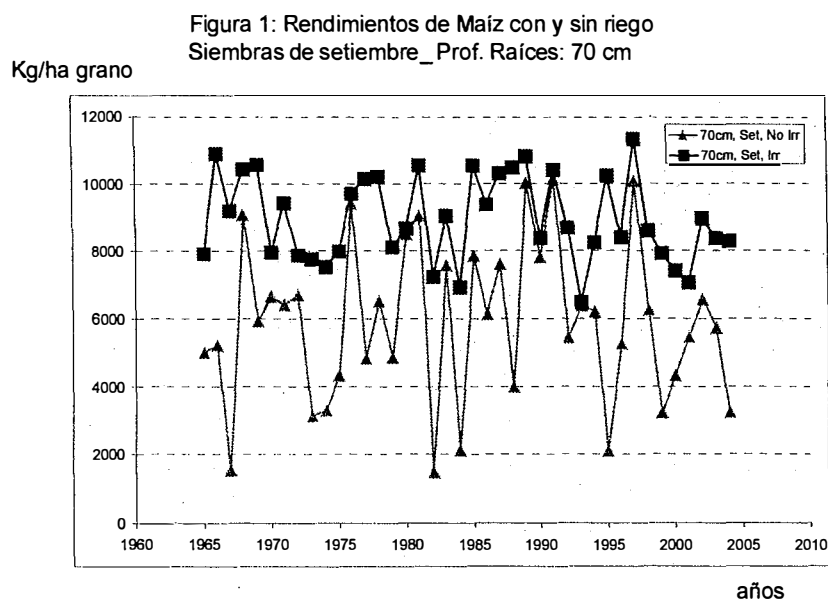
Un criterioso estudio de la potencialidad que presentan los predios y las empresas para el desarrollo de esta práctica y el contraste con otras alternativas tecnológicas que puedan redundar en mejoras de la rentabilidad sin incurrir en cambios sustanciales en la gestión, es tarea prioritaria en el proceso de toma decisiones que conduzca a la definición del tema.

El presente trabajo tiene por objetivo compartir información para ser utilizada en análisis de la factibilidad de riego de maíz en largo plazo.

2.-Magnitud y Frecuencia de las Deficiencias de Agua

La ocurrencia de deficiencias de agua que limitan la productividad del maíz es un hecho que se da con cierta frecuencia y con intensidad variable.

Mediante el empleo de técnicas de manejo de suelos y cultivos y el uso de materiales genéticos tolerantes a la sequía es posible mitigar los efectos de las deficiencias de agua sobre la producción del maíz. Sin embargo los promedios de producción así como su estabilidad son menores a los obtenidos en cultivos con riego (Figura 1).



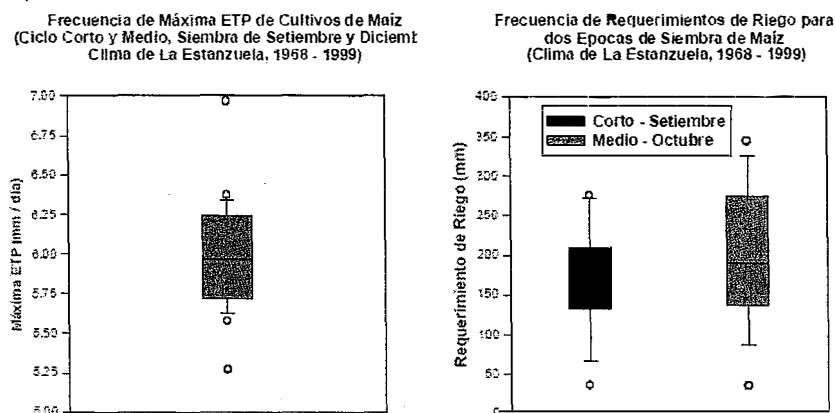
El análisis de la factibilidad de riego implica estimar: la magnitud de las deficiencias de agua, su probabilidad de ocurrencia, sus efectos sobre el rendimiento y el incremento de margen bruto esperado por el riego.

Las diversas combinaciones de los factores involucrados en el diseño de un sistema de riego en un equilibrio racional pueden conducir a niveles de inversión y costos operativos muy variables.

A los efectos del diseño del sistema de riego es necesario definir cual es la cantidad y probabilidad de ocurrencia de las necesidades agua (volumen) y la evapotranspiración potencial (ETP) del cultivo en su período crítico (caudal).

A partir de la definición del volumen y del caudal del proyecto se definen componentes principales de la inversión como son la fuente de agua y los elementos de conducción y bombeo. Los resultados presentados en la figura 2 indican que: (a) los valores de ETP máxima diaria más frecuente oscilan entre 5.75 y 6.25 mm/día, y (b) los requerimientos de riego más frecuentes varían entre 150 y 280 mm.

Figura 2: Estimación de ETP diaria máxima y de requerimientos de riego para maíz de altos rendimientos (calculados con el modelo CERES Maize)



3. Aporte de los modelos de producción al análisis de estrategias de manejo del riesgo a largo plazo.

La evaluación de estrategias productivas orientadas a la reducción de los costos fijos requiere analizar una gran cantidad de variables. Entre otras se pueden citar: la variabilidad climática, los precios del grano, los costos de los insumos, los costos del riego, el manejo del suelo y del cultivo (fertilización, elección del cultivar, época de siembra, laboreo, etc.). La consideración de todos estos factores y de sus interacciones en condiciones de campo es inviable por la complejidad de las situaciones a considerar.

En estos casos, los modelos de simulación de producción de cultivos se constituyen en una herramienta de gran efectividad.

Los modelos de simulación de cultivos son programas de computadora que simulan el desarrollo y el crecimiento vegetal en base a las relaciones que existen entre las plantas y el medio ambiente en que crecen. Es cada vez más clara la tendencia a la aplicación de técnicas de simulación con fines de planificación agropecuaria, ayuda para la toma de decisiones a nivel de país, región o productor.

El cúmulo de información generada, y la creciente accesibilidad de equipos de

computación han llevado a que muchos investigadores en el mundo hayan volcado grandes esfuerzos para el diseño y la construcción de modelos de simulación capaces de predecir procesos biológicos.

Uno de los grupos de modelos que más se han venido utilizando en el mundo son los del DSSAT.

En el presente trabajo se utilizó el modelo DSSAT de maíz (llamado CERES Maize) para evaluar el impacto de diferentes factores agronómicos y económicos sobre los rendimientos, las necesidades de riego y los márgenes brutos de cultivos regados y de secano.

A continuación se presentan algunas figuras de los resultados obtenidos con estos análisis que se tratarán con más detalle en la presentación del trabajo.

Figura 3.- Frecuencia de rendimientos de maíz con y sin riego, tres fechas de siembra Suelo profundo.- La Estancuela 40 años

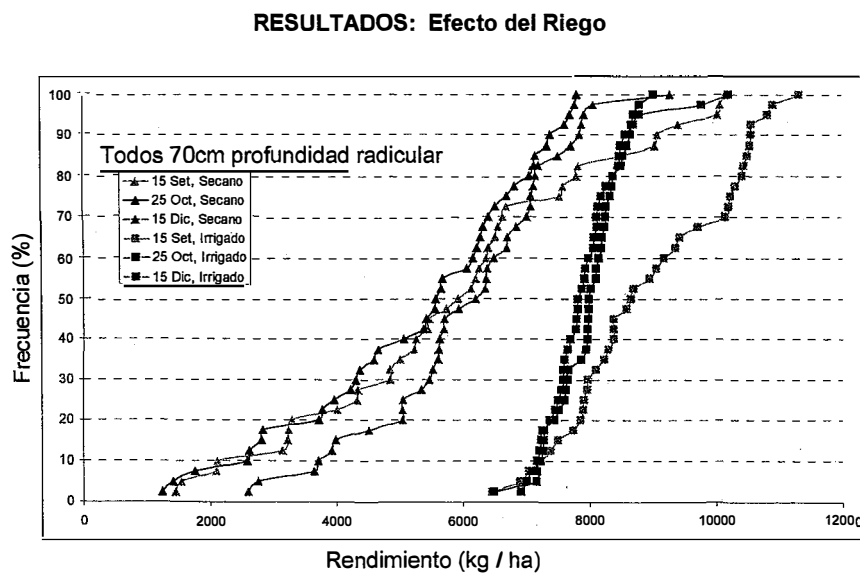


Figura 4: Impacto de la profundidad radicular en la variación de rendimientos de maíz Secano (La Estanzuela, 40 años)

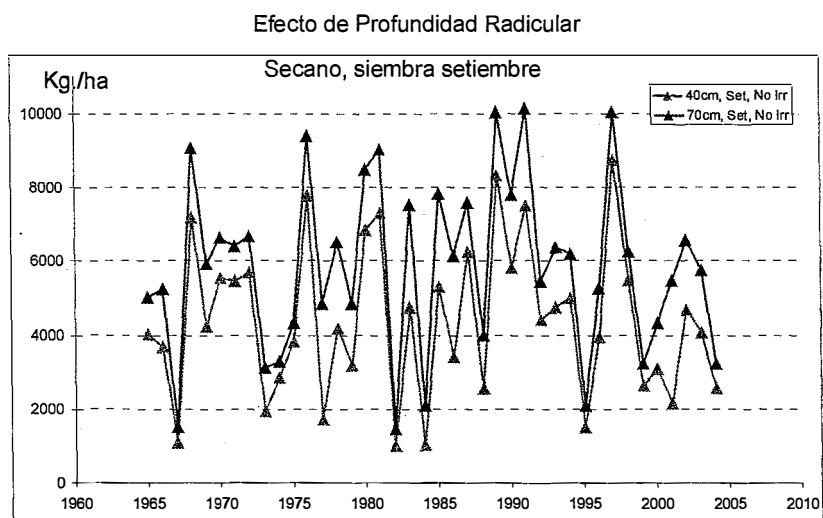
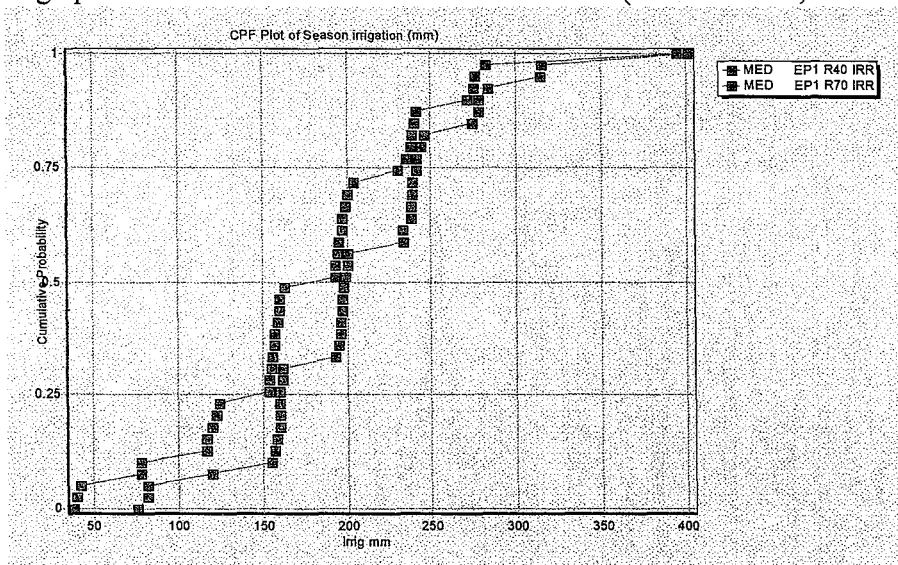
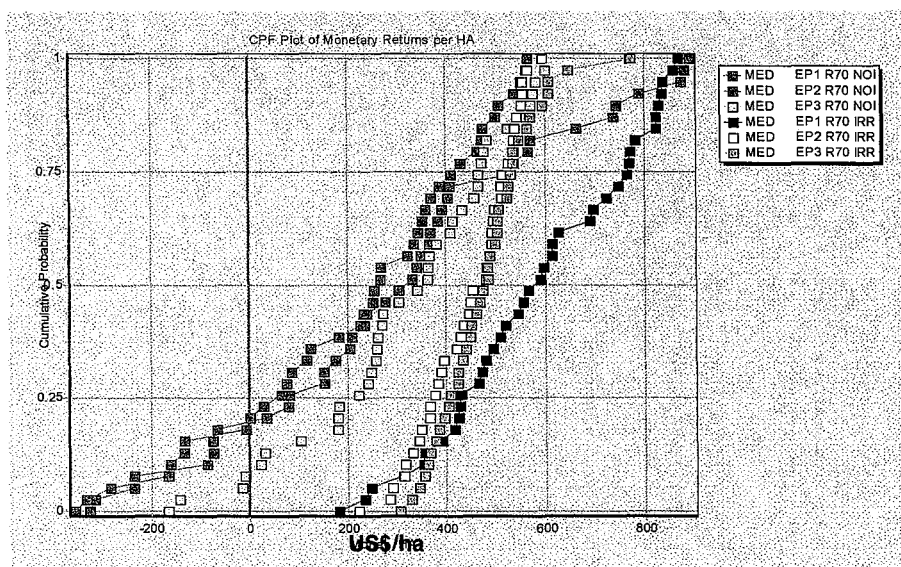


Figura 5: Impacto de la profundidad radicular en la variación de requerimientos de riego para maíz siembra de setiembre ciclo medio (La Estanzuela, 40 años)



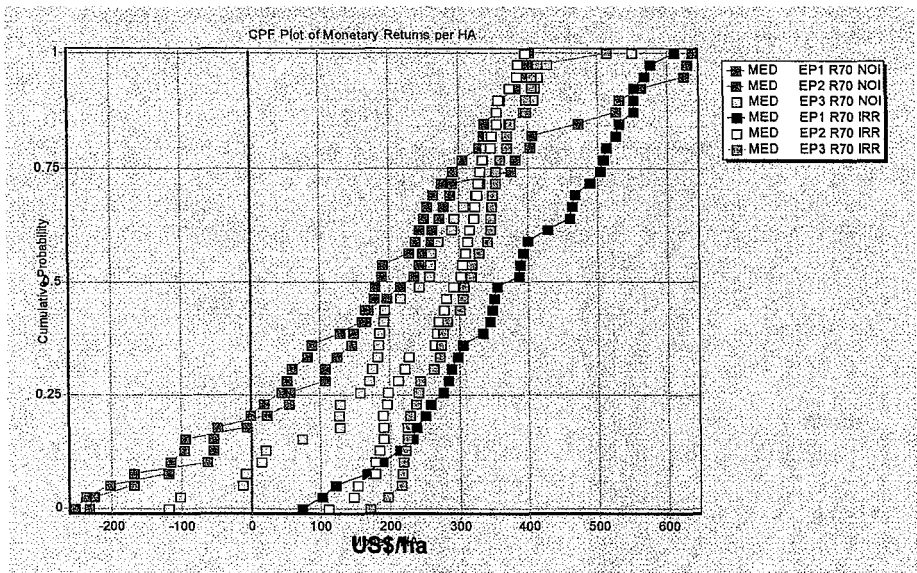
Más suelo precisa menos riego (40 – 500 mm total)

Figura 6.- Margen por Ha con riego y en seco para tres épocas de siembra, ciclo medio. Escenario favorable de precio de maíz.



Costo cultivo=US\$ 550, Costo riego 0.50US\$/mm, Maiz=140 US\$/Ton

Figura 7.- Margen por Ha con riego y en seco para tres épocas de siembra, ciclo medio. Escenario desfavorable de precio de maíz.



Costo cultivo=US\$ 400, Costo riego 0.50US\$/mm, Maiz=100 US\$/Ton

Irrigación de mayores áreas de cultivo de maíz combinando diferentes ciclos y épocas de siembra

Figura 8: Necesidad de riego calculada para dos cultivos de maíz: ciclo corto sembrado en Setiembre y ciclo medio sembrado en Octubre (resultados para un año de gran requerimiento de riego, 1988/89)

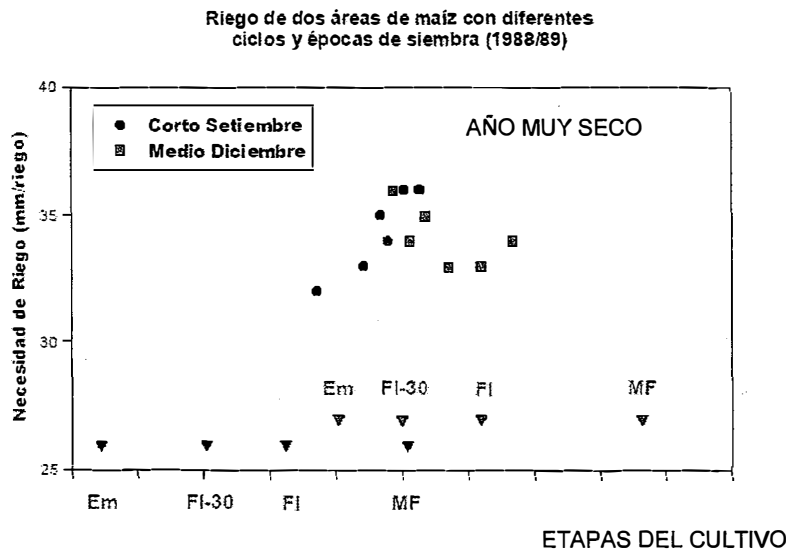
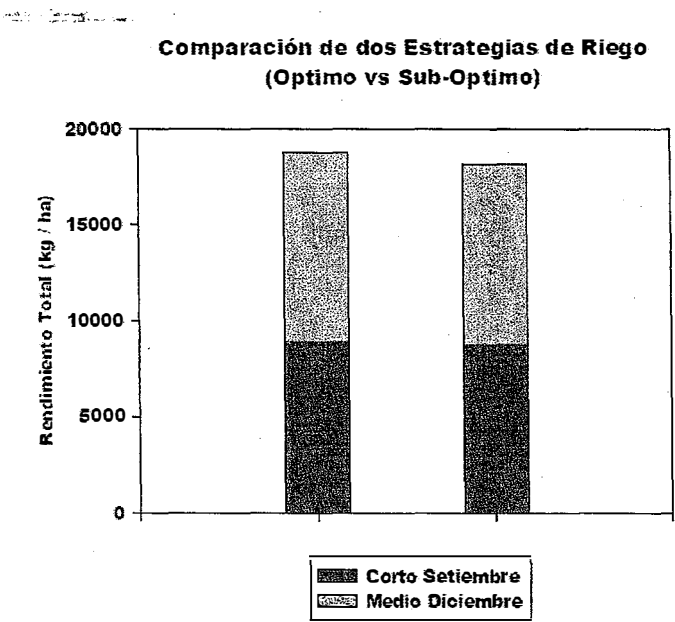


Figura 9: Resultados de producción de dos cultivos de maíz: ciclo corto sembrado en Setiembre y ciclo medio sembrado en Octubre, irrigados con el total del riego estimado (óptimo), y con una estrategia de riego que permite considerar ambos cultivos (sub-óptimo).



Es posible definir estrategias de uso de la inversión para diluir costos fijos de las que se pueden esperar mejoras en los márgenes brutos sin alterar los niveles de seguridad de los proyectos.

Introducción

A pesar de haber estado presente en forma constante, o por lo menos recurrente, en la temática de lo que en términos abarcativos podríamos llamar “ámbito agropecuario”, el tema riego de pasturas se ha mantenido en el terreno de las discusiones, sin retrocesos ni avances que impliquen cambios significativos, ya sea en la generación de nuevos conocimientos o de emprendimientos comerciales, con la salvedad de algunas excepciones.

De estas últimas, con referencia específica a iniciativas privadas en predios dedicados a la producción, e intentando incluir casos conocidos de los últimos 30 o 40 años, queda la impresión que los resultados no han sido claros, algunas veces francamente contrarios a los esperados, aunque en general no existen análisis objetivos de las distintas situaciones como para sacar conclusiones al respecto.

Paralelamente, es interesante hacer notar que dichas experiencias no han tenido mayor difusión a nivel nacional, hecho que contribuye a mantener estabilizada la discusión a la que se hace referencia.

Uno de los factores de confusión son las opiniones subjetivas que ingresan al sector frecuentemente vinculadas a la ocurrencia de un evento de sequía, utilizando datos o cifras que consideradas aisladamente pierden su valor, intentando fundamentar posturas y recomendaciones cargadas de voluntarismo en busca de soluciones al respecto. Uno de los ejemplos es el conocido guarismo que indica que se utiliza solamente el 3% del agua que llueve/escurre sobre la superficie del país y a partir de esto se concluye que el riego en general y el de pasturas en particular es una poderosa herramienta de producción al alcance de la mano no utilizada por falta de visión o de iniciativa. Sin desconocer la cuota de verdad que pueda tener esta aseveración, no cabe duda que se trata de una peligrosa simplificación que sirve normalmente de sustento a los reclamos correspondientes para la “rápida” instrumentación de planes y sistemas de riego para el sector agropecuario.

También es común la crítica que recibe la investigación por no haberse ocupado “suficientemente” del tema y el correspondiente reclamo para que lo haga en el futuro inmediato, volcando los recursos que fueran necesarios para el desarrollo de investigación en el tema con metas ambiciosas y plazos relativamente cortos.

En lo que respecta a la investigación desarrollada en el país, se la puede caracterizar como relativamente escasa o insuficiente como para extraer conclusiones definitivas acerca de los puntos básicos del problema desde el punto de vista biológico y económico. También se puede decir que ha sido discontinua en el tiempo, en las Instituciones, en los Programas o Proyectos y en los investigadores que se han ocupado del tema.

Sin pretender hacer una revisión detallada ni exhaustiva de los trabajos de investigación o experimentación que se han desarrollado en riego de especies forrajeras en el país, se enumeran Instituciones y fechas aproximadas:

- Proyecto para el desarrollo de la cuenca de la Laguna Merin (PLM). Década del 60.
- Estación Experimental del Este (EEE) - CIAAB. Década del 70.
- Estación Experimental La Estanzuela.- CIAAB. Década del 70.
- Facultad de Agronomía. Tesis de Grado.
- Dirección de Uso y Manejo del Agua - MGAP

¹ Ing. Agr., MSc. Programa Pasturas y Forrajes – INIA Tacuarembó

- PROVA – PRENADER . Experimentación de campo/validación.
- INIA La Estancuela a partir de 1997
- INIA Tacuarembó - Glencoe a partir de 2002

Son muchos los factores que inciden en la discusión de la factibilidad del riego de pasturas: variabilidad del clima; disponibilidad de agua; aptitud del terreno en términos topográficos; inversión y costos operativos; opciones alternativas para el uso del agua; sistema de producción adecuado y capacidad de respuesta de las especies a regar. Aunque los que se acaban de enumerar sean probablemente los de mayor relevancia inmediata, no dejan de ser sólo algunos de los múltiples factores a los que se hace referencia.

Los siguientes comentarios no pretenden analizar los factores mencionados y sus consecuencias, sino destacar algunos aspectos derivados de los mismos, de manera que ofician de base a la presentación de algunos resultados de pasturas regadas en un ambiente muy particular como es el que enmarca la rotación “Arroz /Pasturas / Ganadería”.

En primer lugar la variabilidad y difícil predicción del comportamiento climático en general y de la pluviometría en particular que caracteriza la región, constituye una dificultad importante en la decisión de las inversiones necesarias, o bien de la planificación y ejecución del riego en el caso de disponer de un sistema a tales efectos. Esta restricción es mayor en ausencia de medidas de respuesta que permitan racionalizar el análisis correspondiente y la estimación de los riesgos a asumir.

Descartando alguna situación muy particular, que de existir no sería trasladable a otros casos, se puede definir en lo previo que las inversiones destinadas a la construcción de represas con fines de riego de pasturas no deberían ser consideradas. Esto significa que la discusión se plantea a partir de contar con la infraestructura necesaria, entendiendo que la misma no agregaría costos a la producción ganadera, que simplemente pagaría por el uso del agua.

Dejando de lado los sistemas de riego por aspersión que constituyen una problemática diferente y considerando sólo aquellos que se basan en la gravedad, ya sea por inundación o por conducción ordenada del agua en superficie (láminas), la topografía del suelo puede ser una limitante a los fines propuestos, aunque la existencia de una represa supone necesariamente la disponibilidad de un área regable en las cotas inferiores.

El cultivo de arroz tiene prioridad en el uso del agua y en los “veranos secos”, cuando el riego de la pastura sería más conveniente o necesario, es precisamente cuando menores son las probabilidades de existencia de agua excedente a las necesidades del cultivo.

Otro aspecto importante es que en cualquier caso que haya disponibilidad de agua y aunque el sistema sea de base pastoril, siempre conviene analizar las opciones de riego o del uso del agua, incluyendo cultivos forrajeros o de grano, que podrían ofrecer una respuesta biológica y un valor económico superiores al del forraje extra de la pastura regada.

Con referencia a la respuesta productiva física y en el caso de una definición por el riego de pasturas, es muy importante conocer las limitaciones de algunas de las especies de uso más corriente en la siembra de praderas, considerando la conveniencia de incluir en las mezclas especies de ciclo estival, de manera de usar el agua con mayor eficiencia y obteniendo de esa manera mayor cantidad de materia seca por milímetro de agua empleado.

Los trabajos originales con pasturas regadas que se presentan en este artículo se desarrollaron en el seno del PLM, proyecto de desarrollo regional que estuvo orientado al ordenamiento integral del funcionamiento hídrico de la Cuenca de la Laguna Merin, previendo la utilización de parte del agua represada para fines de riego de arroz, pasturas y otros cultivos.

La EEE comenzó sus actividades en 1971, dándole continuidad a una parte de los trabajos que estaban en marcha con anterioridad a esa fecha, los que fueron interrumpidos hacia el final de la década.

Como se mencionó anteriormente, la rotación “arroz/pasturas/ganadería” genera un entorno particular y diferente al de otros sistemas productivos, principalmente por el hecho de incluir un cultivo regado que asegura en todos los casos una fuente de agua y la infraestructura necesaria para su conducción y distribución. Esto no se debe interpretar como una solución para el riego de pasturas, teniendo en cuenta las razones ya mencionadas referidas a los temas de competencia por el agua en términos de cantidad y oportunidad de uso. A pesar de lo dicho, no cabe duda que el hecho de disponer de dicha plataforma, única en los sistemas de producción agropecuaria del país, se trata de una ventaja importante que permite y da fundamento para explorar en el terreno de su factibilidad, por lo menos para algunos casos o situaciones.

Estos sistemas se caracterizan por el destacado desarrollo implícito del área sembrada con pasturas, variando esta según la frecuencia que establezca cada rotación en particular para el cultivo. En todos los casos dicha área es muy importante, ya que como se puede ver en la **Cuadro 1**, el mínimo que correspondería a la secuencia más intensiva previa al arroz continuo (2 años) es de 50% del total del área. Normalmente esta proporción se ubica por encima del 60% y la rotación más larga (8 años), que en casos aislados podría encontrarse en algún predio ganadero del norte del país con represa propia, puede llegar al 75% de la superficie

Cuadro 1. Planteo de rotaciones de distinta intensidad

1	2	3	4	5	6	7	8	9	INTENSIDAD %
A1	A2	P1	P2	P3	P4	P5	P6	A1	25
A1	A2	P1	P2	P3	P4	P5	A1		29
A1	A2	P1	P2	P3	P4	A1			33
A1	A2	P1	P2	P3	A1				40
A1	A2	P1	P2	A1					50
A	R L	R A							50

A = Arroz; P = Pradera; R = Raigrás; L = Laboreo

Las pasturas sembradas por avión caracterizadas por su bajo costo de instalación y su destacada producción de forraje, en la mayoría de los casos están constituidas por raigrás, Lotus corniculatus y trébol blanco, siendo a veces el trébol rojo otro componente de la mezcla. También son utilizadas otras forrajeras aunque carecen de importancia relativa por ocupar áreas de escasa representatividad.

El aumento del área de pasturas y el correspondiente incremento en la oferta de forraje, conlleva naturalmente al uso de dotaciones más altas. Estas “sensibilizan” el sistema demandando una entrega estacional de forraje que el esquema no puede resolver, ya que las especies mencionadas concentran su producción en invierno y primavera, generando carencias durante el verano en forma variable y presentando una insuficiencia grave en los meses de otoño, sin duda la estación más deficitaria desde el punto de vista forrajero.

El esquema de pastoreo que se presenta en la **Figura 1**, correspondiente a una rotación clásica de dos años de arroz y cuatro de pasturas con un verdeo de raigrás entre dos cultivos, muestra porcentajes altos de acceso a las áreas de las pasturas existentes durante el invierno y la primavera, 83 y 92%

respectivamente. En el verano la disponibilidad de uso de las áreas mejoradas baja a 64% afectado por el manejo de semillazón de las praderas de primer y segundo año y en el otoño cae al 7% como consecuencia de la implantación del raigrás y de la pradera de primer año que se siembran a continuación de los arrozces 1 y 2 respectivamente, además del manejo de recuperación después de la limpieza de verano de las praderas de segundo y tercer año.

Figura 1. Esquema de pastoreo en una rotación arroz (2) – ganadería (4)

MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
L P3	Pr 4					L			A1		
L R	Rr					L			A2		
A1	Implantación										L R
A2	Implantación P1								Sem P1		
	Manejo P2								Sem P2		
	Manejo P3										LP3
Total	6 %		83 %				61 %		39 %		
Pradera	7 %		83 %				92 %		64 %		

 Pastoreo Promedio anual área Total 47%; Promedio anual área Pradera 57%

En la medida que se aumenta la dotación para utilizar los picos de producción de la pastura, la sensibilización mencionada no sólo se refiere a los momentos previamente establecidos como limitantes, sino a lo que pueda ocurrir a lo largo del año como consecuencia de la ocurrencia de fenómenos imprevistos que puedan incidir en forma negativa sobre el crecimiento de las pasturas o su utilización.

El riego, aplicado por lo menos con un concepto estratégico, es sin duda una de las posibles soluciones al problema planteado, pudiéndose diferenciar entre la opción del riego de pasturas de ciclo invierno – primaveral ya existentes en el sistema, o bien de pasturas de ciclo estival sembradas y manejadas específicamente con fines de riego.

Pasturas regadas de ciclo invierno – primaveral.

Una ventaja aparente de esta opción es la de disponer de las pasturas del sistema, lo que permite tomar la decisión de regar sobre la marcha sin mayor planificación en lo previo. Sin embargo el método de siembra con avión sin adecuación previa del rastrojo deja una superficie huelleada y con importantes irregularidades en su microrelieve que dificultan o impiden la conducción del agua tanto a los efectos del riego como del drenaje posterior. Para mejorar esta situación se puede pasar un rodillo o rolo sobre el rastrojo recién cosechado y realizar un repaso de la sistematización hecha para el arroz, aunque probablemente la limitación principal esté en la constitución botánica de la pradera.

Analizando la mezcla clásica utilizada en la gran mayoría de los casos, el raigrás es el que menos cuenta ya que en la época de riego está en estado de semilla.

Por su parte el trébol blanco si bien puede responder a la disponibilidad de agua en el suelo durante el verano, es fisiológicamente ineficiente para crecer y competir en esas condiciones ambientales, razón por la cual normalmente es superado por otras especies mejor adaptadas, como es el caso de diversas malezas, gramíneas nativas y muy especialmente gramilla (*Cynodon*). El *Lotus corniculatus*, en función de su ciclo más estival tiene mejor aptitud que el trébol blanco para recibir riego, aunque

presenta algunos problemas que limitan su respuesta. Como normalmente es uno de los componentes de la mezcla forrajera, se prioriza la utilización del raigrás y del trébol blanco a partir del crecimiento otoñal y durante los meses de invierno y primavera, por lo que no se le puede dar al Lotus un manejo específico que favorezca su expresión estival. Los excesos de humedad en el verano pueden facilitar la incidencia de enfermedades que además de disminuir la producción de forraje en forma importante, también afecta la persistencia de las plantas. Cuando el drenaje no es bueno el problema se agrava sensiblemente.

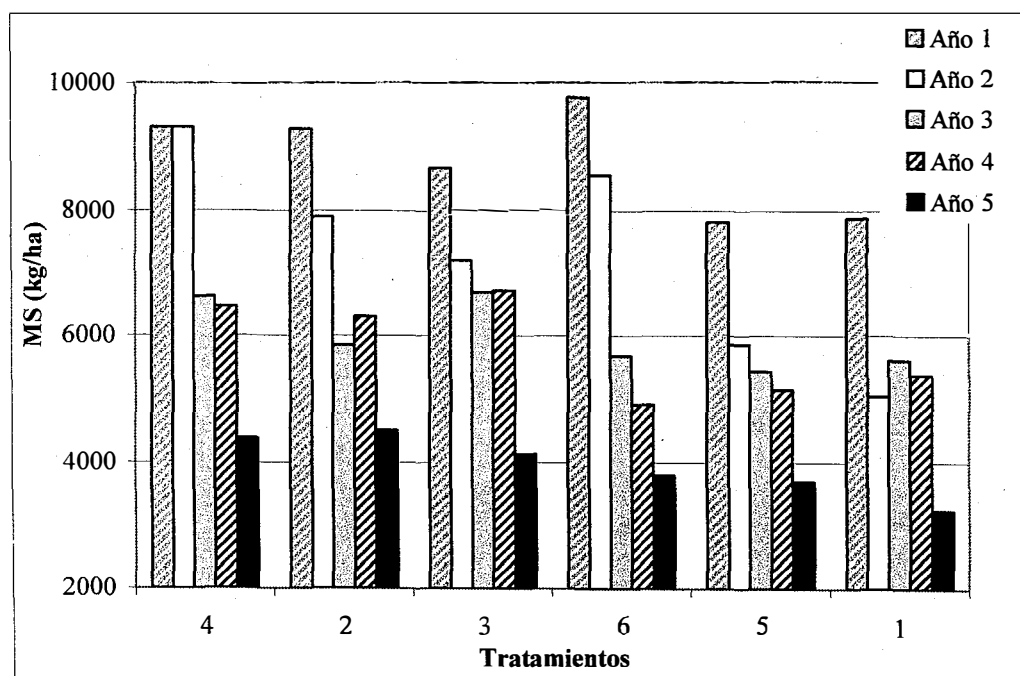
El trébol rojo sería la leguminosa de clima templado con mejor aptitud, considerando que los suelos cultivados con arroz no son adecuados para el crecimiento de la alfalfa. Los aspectos negativos del trébol rojo se centran en su comportamiento bianual. Al igual que en el caso anterior es parte de una mezcla y a los efectos de controlar en parte su condición de leguminosa meteorizante, se la siembra a densidades no muy altas, lo que impide tener un número de plantas elevado en el momento oportuno como para responder adecuadamente al riego.

En cuanto a la posibilidad de utilizar gramíneas perennes, el falaris ocuparía su espacio a nivel del suelo sin producir forraje por su característico descanso fisiológico estival, mientras que la festuca, si bien responde al estímulo hídrico produciendo forraje, su utilización durante el verano atrasa su rebrote otoñal desplazándolo hacia el invierno, comprometiendo su competitividad y persistencia.

Para evaluar el comportamiento de pasturas de ciclo invierno primaveral en condiciones de riego, se instaló un experimento con preparación del suelo (rastreo de arroz) por el método convencional, de manera de eliminar el efecto del microrelieve que enmascararía el objetivo principal. Todos los tratamientos tuvieron una base de trébol blanco, incorporando una gramínea perenne en sustitución del raigrás. Las opciones elegidas fueron festuca, falaris o la mezcla de ambas. Los tres tratamientos definidos por las gramíneas tuvieron la variante de la inclusión o no de Lotus corniculatus, haciendo un número total de seis tratamientos. El experimento recibió riego por inundación y posterior drenaje en función de las necesidades derivadas de los registros pluviométricos, de manera que la humedad en el suelo nunca actuara como limitante para el crecimiento de las plantas. El número de riegos por temporada variaron entre tres y cuatro a partir de la primavera tardía y fundamentalmente durante los meses del verano.

Si bien hay diferencias entre mezclas, la **Figura 2** muestra la tendencia general a la caída de los rendimientos en los años sucesivos, pasando el promedio de los tratamientos de 100 (8.8 Ton. de MS/ha) en el primer año a valores del orden de 80 en el segundo, 70 en el tercero y cuarto y menores a 50 en el quinto. Esta última caída del rendimiento estuvo asociada con una pérdida generalizada de las especies sembradas

Figura 2. Evolución del rendimiento ordenado por años consecutivos



El análisis estadístico de los rendimientos físicos de las distintas mezclas evaluadas en los diferentes años que se muestra en el **Cuadro 2**, no permite extraer conclusiones importantes. Aunque en este trabajo no se muestran los datos correspondientes al análisis de los componentes botánicos de las mezclas, interesa destacar que ambas leguminosas fueron particularmente importantes durante los dos primeros años, comenzando a disminuir su presencia productiva a partir de ese momento. Al cuarto año no superaban el 10% de la materia seca producida, preámbulo a su desaparición total en el quinto.

Este comportamiento mostrado por las leguminosas llama la atención por tratarse de una pastura regada, sugiriendo la existencia de otros problemas involucrados en la persistencia productiva además del nivel de humedad en el suelo. El trébol blanco tuvo un comportamiento superior al esperado, pero las mezclas que incluyeron lotus mostraron tendencia a ser más productivas.

Cuadro 2 Rendimiento de mezclas invernales con riego

Mezclas	T	Año 1	P	Año 2	P	Año 3	P	Año 4	P	Año 5	P	Total	P
F + Tb	1	7885	b	5042	d	5609	c	5377	abc	3241	d	27154	b
F + Tb + L	2	9269	ab	7894	bc	5843	bc	6307	abc	4515	a	33829	a
Ph + Tb	3	8670	ab	7211	c	6692	a	6721	a	4137	abc	33431	a
Ph + Tb + L	4	9286	ab	9289	a	6625	ab	6470	ab	4388	ab	36060	a
F + Ph + Tb +	5	7822	b	5857	d	5433	c	5140	bc	3700	cd	27953	b
F + Ph + Tb + L	6	9776	a	8560	ab	5680	c	4908	c	3801	bcd	32724	a
			t		**		*		t		*		**

t= P<0.10; * = P<0.05; ** 0P< 0.01

Aunque como fue expresado anteriormente, los datos presentados no permiten conclusiones al respecto, el comportamiento tanto de las mezclas como de las especies involucradas, contribuyen de alguna manera a la duda planteada acerca de la conveniencia de regar pasturas de ciclo invierno primaveral. Es importante hacer la salvedad para especies como el lotus o el trébol rojo, las que en siembra pura y con manejo adecuado, podrían presentar un comportamiento mejor al registrado en el caso de las mezclas complejas utilizadas, según indican datos de otros experimentos , que se complementan con observaciones de experiencias de campo. A las limitaciones y desventajas planteadas para el riego de especies de clima templado, se pueden sumar algebraicamente las ventajas de utilizar materiales fisiológicamente adaptados a las condiciones ambientales del verano, con un ciclo coincidente con la estación de riego y un potencial productivo superior, El resultado de la mencionada suma podría ser usado como hipótesis de trabajo para plantear el riego de especies de ciclo estival como una práctica de mayor eficiencia, estimada en unidades de materia seca extra obtenida por cantidad de agua utilizada.

Pasturas regadas de ciclo estival

Antes de pensar en la posibilidad de contar con nuevos reservorios o accesos al agua que pudieran relativizar la demanda por su uso para riego, las restricciones actuales en cuanto a su real disponibilidad y prioridad por el uso de la misma, maximizan lo dicho anteriormente en cuanto a la importancia de aumentar significativamente la eficiencia en cualquier caso y muy particularmente si se trata de regar pasturas. Algunos obstáculos que dificultan el acercamiento a la mencionada “eficiencia”

están representados por los relativamente limitados conocimientos técnicos y prácticos disponibles al respecto y por la falta de “cultura” de riego a nivel del sector ganadero, además de la necesidad no satisfecha del conocimiento de especies forrajeras con un potencial de respuesta superior al de los materiales normalmente utilizados, que sean obtenibles en el mercado

A fines de la década del 60, en el marco de las actividades del PLM y con el mismo objetivo aunque adecuado a la situación de la época, se introdujeron al país especies forrajeras gramíneas y leguminosas, perennes y anuales, originarias en su mayoría de zonas de clima subtropical y algunas del trópico, que fueron evaluadas en principio en suelos “arroceros”, Planosoles Subéutricos de la Unidad “La Charqueada”, correspondiente a la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay de la Dirección de Suelos y Fertilizantes, 1976.

Los materiales fueron evaluados en condiciones de riego por el método de inundación.

Leguminosas

Algunos de los géneros a los que se hace referencia son: *Desmodium*, *Dolichos*, *Glycine*, *Lotononis*, *Macroptilium*, *Pueraria*, *Stylosanthes*, *Vigna*, etc., algunos de los cuales fueron comparados con los testigos *Trifolium repens*, *Lotus corniculatus* y *Medicago sativa*. Este último fue incluido a pesar que las características físicas y químicas del suelo utilizado eran inapropiadas para el crecimiento y persistencia de la alfalfa.

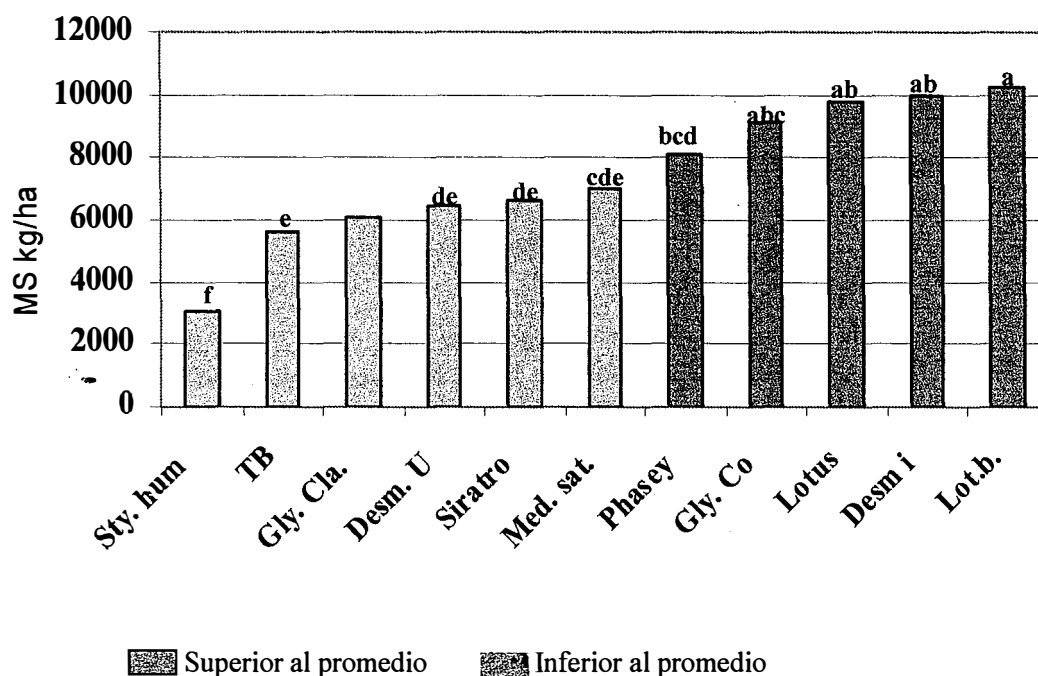
Algunos materiales mostraron claras dificultades de adaptación al medio, fundamentalmente en lo que se refiere a las características climáticas locales, otros se anualizaron siendo perennes en su ambiente de origen, mientras que un tercer grupo mostró un comportamiento productivo más destacado que fundamentó su consideración.

Eliminando los materiales de pobre adaptación, en la **Figura 3** se muestran los resultados de un segundo año (después de pasar la prueba del primer invierno), donde se observa el comportamiento destacado de un grupo de leguminosas que alcanzó rendimientos cercanos a las 10 Ton. de MS/ha., constituido por *Lotononis bainesii*, *Desmodium intortum*, *Lotus corniculatus* y *Glycine javanica* Cooper, sin diferencias significativas entre si y por encima del promedio del ensayo. Otro de los materiales que merece destaque es el *Macroptilium lathiroides* con una producción de 8 Ton., también por encima del promedio, aunque en este caso se trata de una leguminosa anual con una excelente capacidad de resiembra que le permite permanecer productiva de un año para otro sin necesidad de ser sembrada. En el segundo grupo formado por materiales que presentaron rendimientos inferiores al promedio del ensayo se encuentra *Macroptilium atropurpureus*, *Desmodium uncinatum* y *Glycine javanica* Clarence. Esta tres no se diferencian significativamente de la alfalfa y las cuatro son superiores al trébol blanco que se ubica penúltimo, con una producción inferior a las 6 Ton de MS/ha, superando tan sólo al *Stylosanthes humilis*, un material con germoplasma tropical de escasa adaptación al medio. Los años subsiguientes mostraron al *Lotus corniculatus* como el material más destacado desde el punto de vista productivo y con una estabilidad muy superior a los otros materiales probados. El *Lotononis bainesii* fue particularmente irregular entre años. Otro de los aspectos considerados negativos con respecto a las perennes subtropicales fue su notoria dificultad para producir semilla en todos los casos observados. La performance mostrada por el trébol blanco fue pobre, con rendimientos menores a la mitad de la producción de materia seca del *Lotus*, y sus limitaciones de producción estival evidenciadas en condiciones de riego se repitieron en otros experimentos.

Estos resultados no pretenden establecer conclusiones definitivas, pudiéndose pensar en la conveniencia de revisar y actualizar el tema con mayor profundidad. De cualquier manera es de destacar el comportamiento del *Lotus* bajo riego, por lo menos en el tipo de ambiente en que se desarrollaron los ensayos, resultados que fueron corroborados en otras evaluaciones y en otros años.

Los resultados de la evaluación de las leguminosas subtropicales dejan pendiente el tema del inoculante utilizado que pudo haber tenido una influencia importante y hasta definitiva en el comportamiento de algunas de las especies probadas.

Figura 3. Evaluación de leguminosas subtropicales (2^{do} año)



Gramíneas

Las gramíneas en general mostraron un nivel de adaptación muy superior al de las leguminosas. En este caso el tipo de suelo y las medidas de manejo fueron más influyentes o determinantes de su comportamiento productivo y persistencia, que las características del clima. El potencial productivo de algunos de los materiales probados fue muy destacado, constituyendo una posibilidad real de acercamiento a los objetivos buscados. En un experimento se evaluaron 19 gramíneas subtropicales pertenecientes a los géneros *Setaria* (2), *Chloris* (4), *Panicum* (5), *Cenchrus* (4) y *Paspalum* (4). La siembra de este ensayo se realizó recién en el mes de enero, con 90 UF de nitrógeno en dos aplicaciones, coincidentes con sendos riegos.

Los rendimientos del primer ciclo que se presentan en el **Cuadro 3** muestran valores importantes en general y particularmente en el caso de algunas de las gramíneas en evaluación, destacándose el género *Chloris* que ubica los cuatro materiales de *Chloris gayana* (Samford, Katambora, Callide y comercial de Brasil) en los cinco primeros lugares de la tabla, con rendimientos superiores a las 14 Ton. MS/ha, alcanzando en el caso de la variedad Samford 16,4 Ton. siendo significativamente superior al resto de las gramíneas.

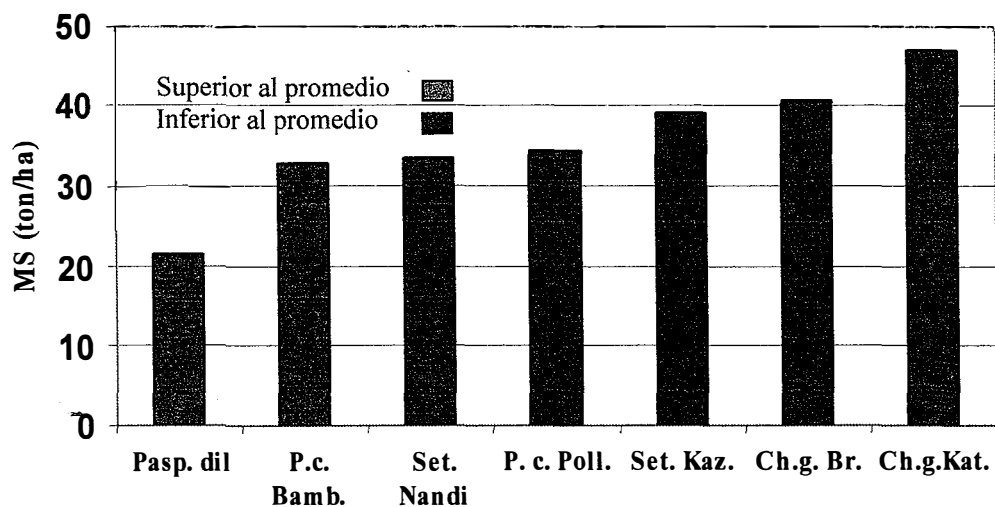
Cuadro 3. Evaluación gramíneas subtropicales, primer año.

Especie	T	MS (kg/ha)	P
<i>Paspalum dilatatum</i> com. Australia	6	5367	i
<i>Panicum antidotale</i> Blue Panic	10	5427	i
<i>Paspalum notatum</i> Pensacola	7	6193	hi
<i>Paspalum wettsteinii</i>	19	6815	h
<i>Panicum coloratum</i> Bambatsii	20	8474	g
<i>Panicum coloratum</i> Pollock	11	10577	f
<i>Cenchrus ciliaris</i> Gayndah	9	10998	f
<i>Cenchrus ciliaris</i> Biloela	1	11229	ef
<i>Cenchrus ciliaris</i> Nunbank	14	11462	ef
<i>Setaria anceps</i> Nandi	15	11794	de
<i>Cenchrus ciliaris</i> Molopo	13	12219	cde
<i>Panicum aximum</i> Trichoglume	17	12315	cde
<i>Paspalum commersonii</i>	3	12893	cd
<i>Setaria anceps</i> Kazungula	8	13400	bc
<i>Chloris gayana</i> com. Brasil	4	14325	b
<i>Panicum maximum</i> Gatton	2	14685	b
<i>Chloris gayana</i> Callide	16	14713	b
<i>Chloris gayana</i> Katambora	12	14839	b
<i>Chloris gayana</i> Samford	18	16397	a
Promedio		11270	**

En el segundo ciclo se observó algún problema de adaptación que evidenciaron unas pocas gramíneas, pertenecientes al género *Cenchrus*, el que es indicado en la bibliografía como resistente a las condiciones de falta de agua. Los materiales de *Cenchrus* evaluados en ensayos de secano en un suelo de mejor drenaje interno que el anterior, se comportaron mejor que en condiciones de riego, especialmente en lo que respecta a su persistencia productiva. También se observó algún otro ejemplo de inadaptación como el *Paspalum wettsteinii*, aunque en este caso el problema pareció deberse más al clima que al tipo de suelo. De cualquier manera lo más destacado de este segundo año fueron otra vez los rendimientos, en algunos casos superiores a los más altos del año anterior. La *Setaria sphacelata* Kazungula trepó del sexto al segundo lugar con un rendimiento de 15.7 Ton. y el *Chloris gayana* comercial del quinto al primero con 17.7 Ton. MS/ha.

En la **Figura 4.** se muestran los resultados de los tres primeros años acumulados de las siete gramíneas que se mantuvieron productivas durante dicho período. Como se observa el *Chloris gayana* reafirmó su importancia con 47 Ton. producidas por la variedad Katambora sin diferenciarse del comercial. A su vez este último no logra separarse de la *Setaria* Kazungula que aporta 39 Ton. El *Panicum coloratum* mostró un buen comportamiento a través de las variedades Pollock, sin diferencia con la Kazungula, e igual a la Bambatsi, sin diferenciarse ambas con la *Setaria* Nandi y formando un grupo con rendimientos que rondan las 33/34 Ton. El *Paspalum dilatatum* de origen australiano aunque con buena persistencia, mostró una producción muy inferior, en el orden del 60% del promedio del ensayo y menor al 50% de los materiales superiores

Figura 4. Primeros tres años acumulados de gramíneas subtropicales con riego



De los datos presentados surge con bastante claridad el potencial productivo de estos materiales que en condiciones de riego pueden alcanzar niveles de eficiencia muy superiores a los alcanzables con especies de clima templado.

Respuesta al riego

La información manejada en el presente artículo, surge de experimentos que no fueron diseñados para medir el efecto del riego sobre las pasturas, sino que el objetivo consistió en relevar la limitante que significa la falta de agua en el suelo, para medir la expresión productiva de las mismas en dichas condiciones.

Asumiendo la complejidad del tema y las limitaciones de la metodología que se propone, a los simples efectos de tener una idea primaria de lo que puede significar el riego como estímulo de crecimiento, se recurre a promediar rendimientos de distintos experimentos con y sin riego en diferentes años, intentando generar una cifra de referencia para la discusión del tema.

En el **Cuadro 4** se puede observar que las leguminosas subtropicales presentan un índice de respuesta superior al del Lotus, probablemente por su escasa aptitud para crecer con limitaciones de agua, lo que se nota en los bajos rendimientos que presentan en ausencia de riego. En contraposición a esto, el Lotus se caracteriza por poseer un sistema radicular que lo hace más eficiente en la exploración del suelo cuando el agua es limitante y su rendimiento en esas condiciones resulta ser aproximadamente 60% superior. Aunque la producción del Lotus con riego es de 9 Ton., la situación explicada eleva el denominador explicando el cociente menor con respecto a las otras.

Cuadro 4. Estimación de respuesta al riego en leguminosas

LEGUMINOSA	RENDIMIENTO (MS/ha)		R/S
	RIEGO	SECANO	
Lotus corniculatus	9030	4650	1.9
Desmodium intortum	7200	2940	2.4
Lotononis bainesii	8090	2880	2.8

Nota: promedio de varios años y experimentos. R/S = cociente riego/secano

En el caso de las gramíneas como indica el **Cuadro 5**, la amplitud de índices de respuesta es importante. El más bajo corresponde al *Paspalum*. Tanto el dilatatum como el notatum mostraron un aumento en el rendimiento relativamente menor cuando recibieron riego, generando un incremento del orden del 50 o 60% sobre la producción de secano. En la franja siguiente el riego significó en todos los casos un factor multiplicador superior a dos, comenzando en la parte inferior por la *Setaria* con un índice de 2.2, hasta un máximo de 4.4 en el caso del *Panicum maximum* Gatton. También en estos casos hay que estudiar tanto el numerador como el denominador para interpretar el cociente. En el caso de la *Setaria* que presentó un índice relativamente bajo, este se debe a la condición de poder crecer en ausencia relativa de agua, mientras que el máximo de 4,4 mostrado por el “Gatton”, se puede explicar por ser un material sensible a la falta de agua y tener una capacidad importante de responder al riego en presencia de nitrógeno. De esta manera disminuye el denominador y aumenta el numerador, explicando el cociente más alto de los casos estudiados. En algunos casos. la fertilización podría ser un elemento de distorsión en la estimación del efecto riego.

Cuadro 5. Estimación de respuesta al riego en gramíneas

GRAMÍNEA	RENDIMIENTO (kgMS/ha)		R/S
	RIEGO	SECANO	
<i>Paspalum dilatatum</i> com. Australia	7120	4710	1.5
<i>Paspalum notatum</i> Pensacola	6190	3910	1.6
<i>Setaria anceps</i> Kazungula	12990	5930	2.2
<i>Chloris gayana</i> Callide	13630	5160	2.6
<i>Chloris gayana</i> com. Brasil	13580	5100	2.7
<i>Panicum coloratum</i> Bambatsi	10960	3805	2.9
<i>Chloris gayana</i> Katambora	15650	4960	3.2
<i>Panicum maximum</i> Gatton	14420	3280	4.4

Nota: promedio de varios años y experimentos R/S = cociente riego/secano

En realidad las fuentes de distorsión pueden ser muchas tomando en cuenta los numerosos factores que intervienen en la definición de la respuesta final, además de las interacciones que se puedan producir entre los mismos. Uno de los problemas que ha sido observado reiteradamente a través de los años es el que se relaciona con la oportunidad del riego referido al momento de hacerlo efectivo, en función de la demanda generada como elemento definible y del comportamiento del clima en el tiempo inmediato posterior al riego como factor no manejable o por lo menos de manejo relativamente incierto tomando en cuenta los pronósticos climáticos. Normalmente la decisión de regar se toma cuando el suelo ha agotado un determinado porcentaje del agua disponible en el perfil, interviniendo además el tipo de suelo, el tipo de cultivo o pastura en este caso, el estado fisiológico de las especies, la época del año, los objetivos de producción trazados, la disponibilidad de agua y el umbral de riego que se haya establecido, entre otros factores. El camino a seguir consiste en esperar hasta que se produzca el déficit de agua planificado para reponer el faltante mediante la aplicación de una lámina calculada o simplemente por inundación y drenaje posterior del exceso, permitiendo que el status hídrico del suelo recupere la condición de capacidad de campo. Con ese manejo es que se puede esperar la obtención de diferencias importantes entre la producción de lo regado con respecto a lo no regado. En la medida que se espera que se agote el agua del suelo hasta alcanzar el umbral determinado, aumentan las probabilidades de ocurrencia de lluvias simplemente como consecuencia del tiempo transcurrido. Cuantos más días pasan menos faltan para que se produzca la próxima precipitación y más se aumenta la probabilidad que el riego coincida con la misma. Cuando llueve inmediatamente después o en plazos cercanos al riego, el exceso de agua puede actuar en detrimento del crecimiento de las plantas, mientras

que la situación de secano queda en condiciones ideales para crecer, pudiendo superar al tratamiento con riego.

En un experimento de observación se compararon tres mezclas estivales con y sin riego. Se midió la respuesta en términos de crecimiento diario en materia seca. Para el presente caso se seleccionó la mezcla con *Setaria sphacelata* cv. Kazungula. Las otras dos fracciones analizadas corresponden a *Lotus corniculatus* y *Trifolium repens*. Se realizaron las mediciones durante el quinto ciclo productivo de la pastura. En el período que se analiza, los cortes para estimar rendimiento fueron realizados en las fechas 18/11; 07/01; 13/02 y 10/05 y los riegos el 15/12; 30/12 y 26/02. La fertilización anual fue de 40 kg/ha de P_2O_5 en forma de Superfosfato. No se fertilizó con Nitrógeno. No se incluye la producción registrada hasta el corte del 18/11 (3.3 ton MS) por no tener efecto del tratamiento, ya que el primer riego tuvo lugar después de dicho corte.

Como se puede apreciar en la **Figura 5.**, tanto en lo previo como posteriormente al corte realizado el 18/11 las lluvias registradas fueron muy escasas, por lo que los riegos efectuados antes del segundo corte, podrían explicar parte de las diferencias registradas entre ambos tratamientos. La pastura regada creció en el período de 50 días entre cortes a una tasa de 82 kg. MS/ha/día, lo que significa 4.5 veces más que secano, cuya tasa de crecimiento para el mismo período fue de sólo 18 kg./día. En este período el lotus hizo una contribución 2.5 veces mayor que la del trébol blanco que al igual que en otros experimentos volvió a mostrar serias restricciones para crecer en los meses del verano.

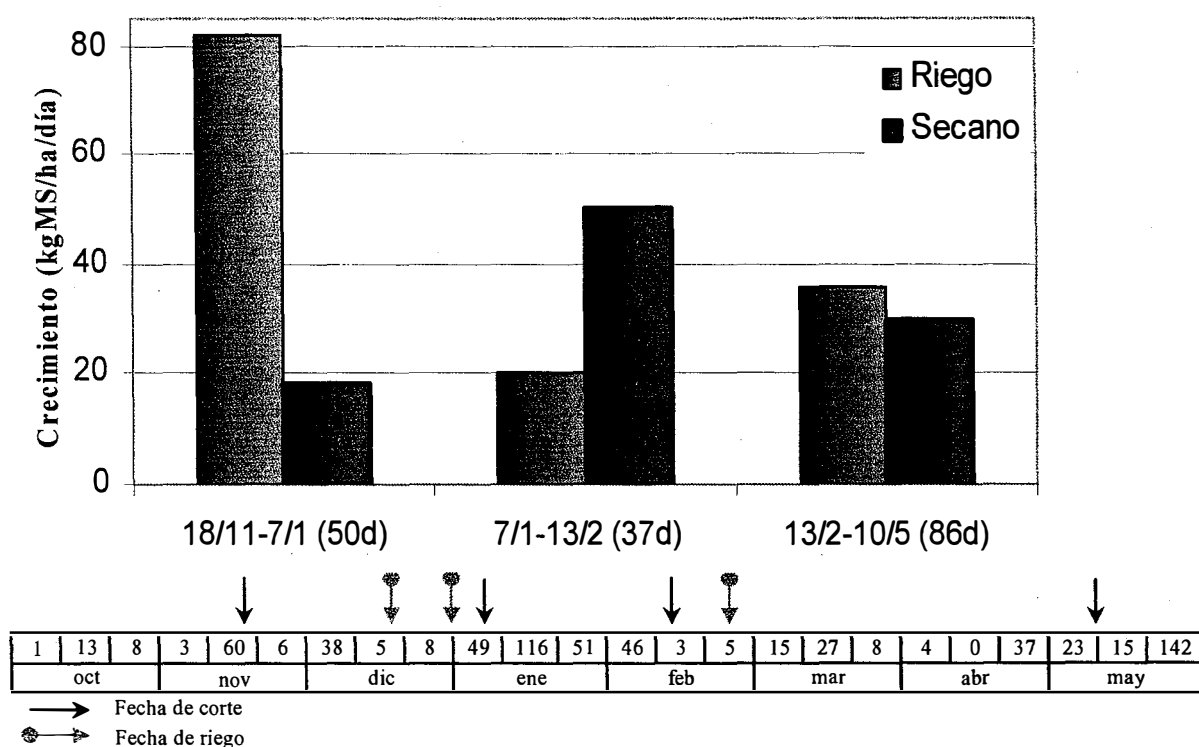
Inmediatamente después del último riego efectuado el 30/12, se inició un período con abundantes precipitaciones que acumularon más de 260 mm. hasta el siguiente corte del 13 de febrero. En este caso se invirtió la situación anterior y el tratamiento de secano creció 2.5 veces más que el regado cuya tasa fue de 20 kg./día contra 50 del sin riego, Tomando en cuenta la pluviometría registrada y el tipo de suelo caracterizado por su drenaje “imperfecto”, es muy probable que el riego haya generado condiciones adversas para el crecimiento favoreciendo la permanencia de un exceso de agua tanto en el perfil del suelo como en superficie.

Después del corte del 13/2 se instaló un período seco y el riego efectuado a fines de febrero mostró una tendencia a favorecer el tratamiento riego que produjo 20% más que el secano. Si bien el resultado indica una tendencia lógica, hay que considerar que es una época en que las especies involucradas y fundamentalmente la *Setaria* reducen significativamente sus tasas de crecimiento independientemente de la disponibilidad de agua, limitando la posibilidad de estimar o explicar respuestas al riego.

Aunque no se muestran los resultados correspondientes, en este ensayo el lotus respondió bien al riego en el período noviembre diciembre, mientras que el trébol blanco volvió a mostrar una baja performance con tasas de crecimiento de apenas 40% comparadas con las del lotus.

El caso planteado es de común ocurrencia en la práctica del riego y es muy importante tenerlo en cuenta porque cuando coinciden el riego con la lluvia significa una pérdida por el costo de la aplicación, que por lo menos en algunos casos se puede incrementar por disminución de los rendimientos de acuerdo a las razones comentadas y básicamente producidas por el desplazamiento físico del oxígeno del suelo por el agua.

Figura 5. Efecto del riego en el crecimiento de una pastura estival de cinco años



Aportes finales para la discusión

Las posibilidades de almacenar agua en el país son potencialmente importantes, por lo que se puede pensar en un futuro con una capacidad de riego instalada muy superior a la actual, que en su gran mayoría está constituida por los sistemas de riego utilizados por el arroz.

El sector arrocerero está integrado en una cadena agroindustrial exportadora particularmente muy sólida y ha demostrado históricamente ser relativamente insensible a los vaivenes de los precios desde el punto de vista del área plantada, de los rendimientos del cultivo, de la intención de siembra futura y del uso del agua.

En los últimos treinta años se han presentado distintos proyectos para regar otros cultivos con el agua del arroz sin que ninguno haya podido desplazarlo ni competir por área (soja, sorgo, maíz).

Las circunstancias actuales son muy diferentes y las presiones derivadas del precio de los granos entre otros factores son muy fuertes. De cualquier manera las diferencias con el precio del arroz deberían ser mucho más marcadas que en otros sistemas para convertirse en una posibilidad real de competencia por agua y tierra, por lo menos en las zonas tradicionales donde los suelos y el drenaje dificultan o directamente impiden la diversificación de cultivos.

La integración del sistema arrocerero/ganadero es una realidad instalada en todas las zonas del país donde se planta arroz. En el norte, el 71% de los rastrojos que no retornan utilizan la tecnología de siembra de pasturas. (DIEA 2007).

El riego del arroz es en general ineficiente por las pérdidas relativamente elevadas de agua que se producen. Aunque prácticamente y en el corto plazo sería muy difícil, si en el futuro se pudiera mejorar la eficiencia en el riego del arroz existiría la posibilidad de regar la misma superficie con menos agua. De esa manera se dispondría de un excedente relativamente menor pero probablemente suficiente para regar pasturas dentro del sistema, ya que de cualquier manera la cantidad de agua resultante sería insuficiente para pensar en áreas importantes de otros cultivos.

El precio de la carne y su proyección de mediano plazo le permite a la ganadería ocupar un lugar destacado dentro del sistema que presenta importantes beneficios tanto biológicos como económicos.

La actividad ganadera se ajusta a los tiempos del cultivo sin competir por el uso de la tierra, aportando fertilidad en términos físicos y químicos que contribuyen a la conservación del recurso y a la sostenibilidad del sistema.

Las exigencias para intensificar la producción ganadera son evidentes y están dadas entre otros factores por el precio del producto y por el de la tierra y su renta.

Como se planteó en el presente trabajo el sistema ganadero integrado al arroz necesita mejorar la distribución estacional de oferta o disponibilidad de forraje de manera estable y segura, para poder trabajar con dotaciones altas que permitirían una utilización más eficiente del forraje y un “salto” hacia niveles superiores de producción.

Como la cantidad de agua necesaria para regar una pastura es muy inferior a la que emplea el arroz por unidad de superficie y como a su vez la superficie a regar sería un porcentaje menor de la superficie del sistema ocupada por la ganadería, la posibilidad de regar pasturas en estas circunstancias es cada vez más real.

Esta tesis se ve reforzada por el hecho que en el norte muchas represas son propiedad de los propietarios de la tierra, que además de venderle el agua al arrocero comienzan a interesarse en usar una parte de la misma para su sistema de producción ganadero. Sin embargo conviene tener presente que estas áreas de suelos fértiles y relativamente bien drenados serían las más sensibles a la competencia de otros cultivos que podrían sustituir el sistema actual.

Si en estas circunstancias y dejando establecido una vez más que el riego de pasturas no competiría por el agua del arroz se hacen los siguientes comentarios.

- Los conocimientos actuales deberían mejorarse aunque es bueno reconocer que existe más información de lo que se piensa en general por parte de los usuarios potenciales. Se entiende conveniente actualizar algunos datos, y medir puntualmente respuestas al riego de nuevos materiales a utilizar. Otro punto relevante es disponer de la información necesaria para el manejo de la fertilización en condiciones de riego. El monitoreo y medición objetiva de parámetros en predios comerciales permitiría un avance rápido y eficiente en la disposición de coeficientes técnicos para trabajar en modelización
- En ningún caso se considera viable la inversión en estructuras de almacenamiento de agua para el riego de pasturas.
- Los riegos deberían pensarse como estratégicos en función de las limitaciones de agua.
- Se considera inconveniente regar superficies que no hayan sido adecuadas para conducir el agua, siendo tan importante la entrada como la salida de la misma.
- Las pasturas a ser regadas no tienen por que ser las ya existentes. Es importante buscar los materiales que tengan mayor respuesta y mayor potencial de producción.
- Las especies de clima templado y de ciclo invierno primaveral no parecen ser las mejores, aunque el Lotus y el Trébol rojo tienen aptitudes interesantes en algunos casos. El trébol blanco no debería destinarse a estos fines, por lo menos las variedades comúnmente usadas.
- Existen gramíneas subtropicales de gran potencial de producción que podrían utilizar el agua con una eficiencia superior. Como ejemplo y sin ser las únicas, se mencionan la *Setaria sphacelata* y el *Chloris gayana*.
- Recordando la importancia del microrelieve de la superficie a regar, considerando los costos de la infraestructura y sistematización y apostando a la perennidad de los cultivos forrajeros recomendados, sería conveniente que el área de riego no estuviera incluida en la rotación,

Esquema presentación:

1. Presentación de la empresa
2. Necesidades de agua, por que Riego?
3. Metodología Riego
 - Énfasis en Maíz & Sorgo
4. Resultados
 - Énfasis en Maíz & Sorgo
5. Demandas & Necesidades

1. PRESENTACION DE LA EMPRESA

- Donistar S. en C.
- Es una empresa arrocerera que planta 1.000 a 1.200 ha de arroz por año
 - Inserta en una empresa ganadera y participa en la rotación agrícola ganadera de esta empresa (en la estabilidad de la producción forrajera & granos para suplementación y diversificación de rubros)
 - La combinación de rubros (la rotación agrícola ganadera) se lleva acabo con criterios conservacionistas, buscando un sistema de producción sostenible en el tiempo. El cuidado del ambiente donde se desarrollan las prácticas productivas es clave en este sentido dado que se lleva a cabo un uso de suelos relativamente intensivo y el riego:
 1. rotación de 2 años de arroz, 1 de otro cultivo de verano y de 3 a 4 años de praderas dependiendo del sistema de riego.
 2. anualmente se pretende regar los cortes de arroz, el corte de cultivo de verano y algo de la pradera
- Ubicación
- El establecimiento y las chacras se ubican en el departamento de Salto a 75 Km. de la ciudad de Salto por ruta 31
 - Paraje Colonia Itapebí
 - Costa con el Río Arapey
- Recursos Disponibles
- Suelos
 1. Unidad Itapebí 3 Árboles
 2. Establecimiento con suelos superficiales & aptos para agricultura (suelos profundos clase A & B según la clasif. del MGAP, donde se desarrolla la actividad agrícola)
 3. Área agrícola: Vertisoles & Brunosoles, en menor proporción litosoles con prof. mayor a 25cm (pedregosidad o perfil A-C)
 4. Valores altos de fertilidad de suelos agrícolas:

pH	M.O.	Bray 1	P Cítrico	Textura			K	CIC pH7	Bases Tot.	% Sat.
Agua	%	ppm	ppm	Arena	Limo	Arcilla	meq/100g	meq/100g	meq/100g	Bases
5,9	6,5	4,7	15	25	40	35	0,7	36,5	30,2	82,7

- Agua
 1. La siembra de arroz posibilitó la inversión en represas & canales para riego. Esta inversión beneficia un área de 4.000ha de tierras aptas para agricultura (suelos de alta fertilidad donde se desarrolla la rotación)
 2. Tomas de agua del Río Arapey, con sistemas de riego instalados & electrificación
- Equipos & implementos
 1. Se dispone de equipos específicos para la sistematización del cultivo de arroz:
 - Equipos de nivelación Láser, taiperas
 - Lanplane
 - Traíllas para mantenimiento de represas & canales
- RR.HH.

El cultivo de arroz posibilitó además de montar la infraestructura de almacenamiento y conducción de agua, generar conocimiento en el riego superficial. Las condiciones de suelos y clima determinan un gasto de agua excesivo sino se controla adecuadamente, esto llevó a que el equipo técnico fuera buscando alternativas para bajar el gasto de agua.

 1. Técnicos:
 - De DSC, Santiago Bandeira, Juan Carnelli, Alejandro Castro, Manuel Barquín, Pablo Silveira
 - INIA LB (Claudio García y Roberto Docampo) que a través del servicio de riego que suministran permiten medir y evaluar las técnicas empleadas y ajustar propuestas. INIA Tbó. (Andrés Lavecchia) que lleva adelante las tesis de graduación en riego que se llevan a cabo.
 - Universidad de Sta. María (UF SM), (Reimar Carlesso)
 2. Aguadores:
 - Es quien termina "regando" propiamente y por ende define el éxito o fracaso de la propuesta y TODO el trabajo previo.
 - En este momento en el equipo de trabajo hay aguadores que se han ido capacitando y aprendiendo con los técnicos y "sobre la marcha" con el costo que ello significa. Se aprendió y aprende de los errores.
 - Hay 4 aguadores que están desde el inicio (14 años) y por ende comprenden perfectamente las necesidades y propuestas del sistema
 - La base del resto de aguadores está formada por 10 operarios que hace 6 años que están en la empresa y debidamente entrenados y dispuestos a cambios y ajustes permanentes.

2. NECESIDADES DE AGUA, RIEGO

En líneas generales tanto cultivos como pasturas tienen periodos de déficit hídrico durante el verano. Estos podrán ser o NO severos y afectar la producción en mayor o menor medida. Si es cierto que inclusive en años llovedores o promedio la distribución de las lluvias NO se ajusta la ET de las plantas y capacidad de almacenamiento de los suelos.

Las altas temperaturas del verano y escasa profundidad de suelo genera una necesidad de lluvias correctamente distribuidas si se pretende producir a los máximos potenciales (tanto pasturas como granos). La **errática distribución de las lluvias** (además de lo impredecible de las mismas) genera esos déficits. En la zona de basalto se ve agravado por la presencia de arcillas expansivas que se contraen y agrietan, lo que aumenta sensiblemente la evaporación directa del agua almacenada en los suelos sin ser usada por las plantas. Por otro lado, las lluvias cuando se registran en verano tienen una intensidad alta y lo que realmente se aprovecha o infiltra al suelo es en promedio 70-80%, el resto escurre

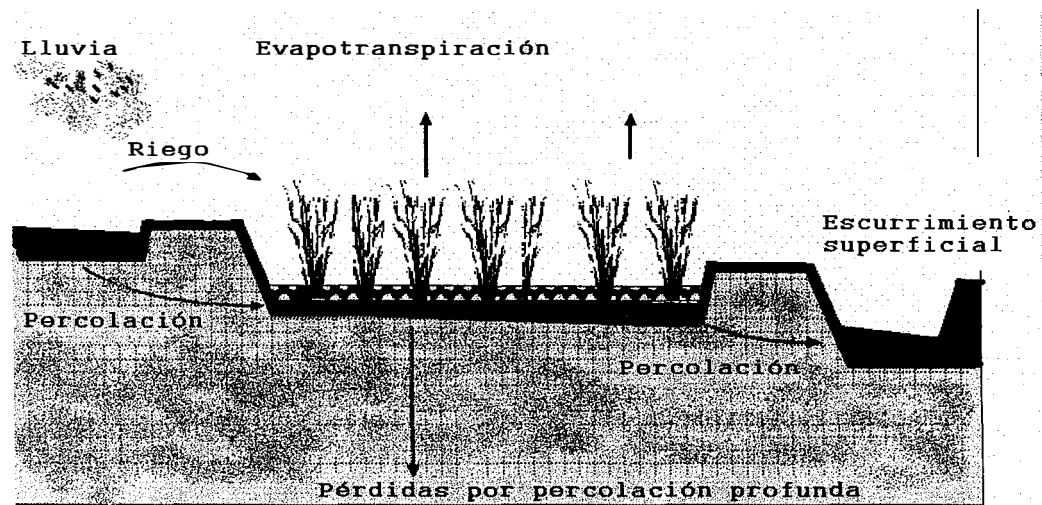
superficialmente y NO recarga el perfil. Esto tb. explicado por la baja infiltración promedio de los suelos al expandirse las arcillas.

➤ Arroz

- El cultivo de arroz es con riego en el Uruguay. El método de riego es por inundación dado que está adaptado (aerénquima) a ese medio, lo que le permite competir mejor con malezas, usar la lámina de agua como buffer de temperaturas y naturalmente cubrir ET del cultivo.

- Esta necesidad de riego posibilitó el aprendizaje de la empresa en el uso del agua (almacenamiento & distribución):

1. Con los manejos tradicionales que empleaba la empresa se registraban excesivos gastos para la disponibilidad de agua o inversión realizada. Los volúmenes de agua almacenados para riego de arroz con un manejo de inundación en las condiciones donde se desempeña la empresa NO eran suficientes, por lo que este cultivo durante los primeros años por más de tener una inversión en almacenamiento de agua, se terminaba dependiendo de las lluvias durante el verano para reponer el agua en las represas. Se gastaba más agua de la que reservábamos al inicio de cada zafra.



Esquema de balance de agua en un campo de arroz.

- Los movimientos de el agua en el cultivo de arroz aparte de la Evapotranspiración (único gasto de agua productivo, lo que pasa por la planta) son las pérdidas por percolación profunda (NO siempre está presente el horizonte impermeable B_t , tampoco existe un A_2 como en los planosoles de la zona este) y/o escurrimiento superficial y sub - superficial.

2. Atendiendo a ese gasto excesivo de agua, se propuso ajustar la metodología de riego a las demandas del cultivo & suelos.

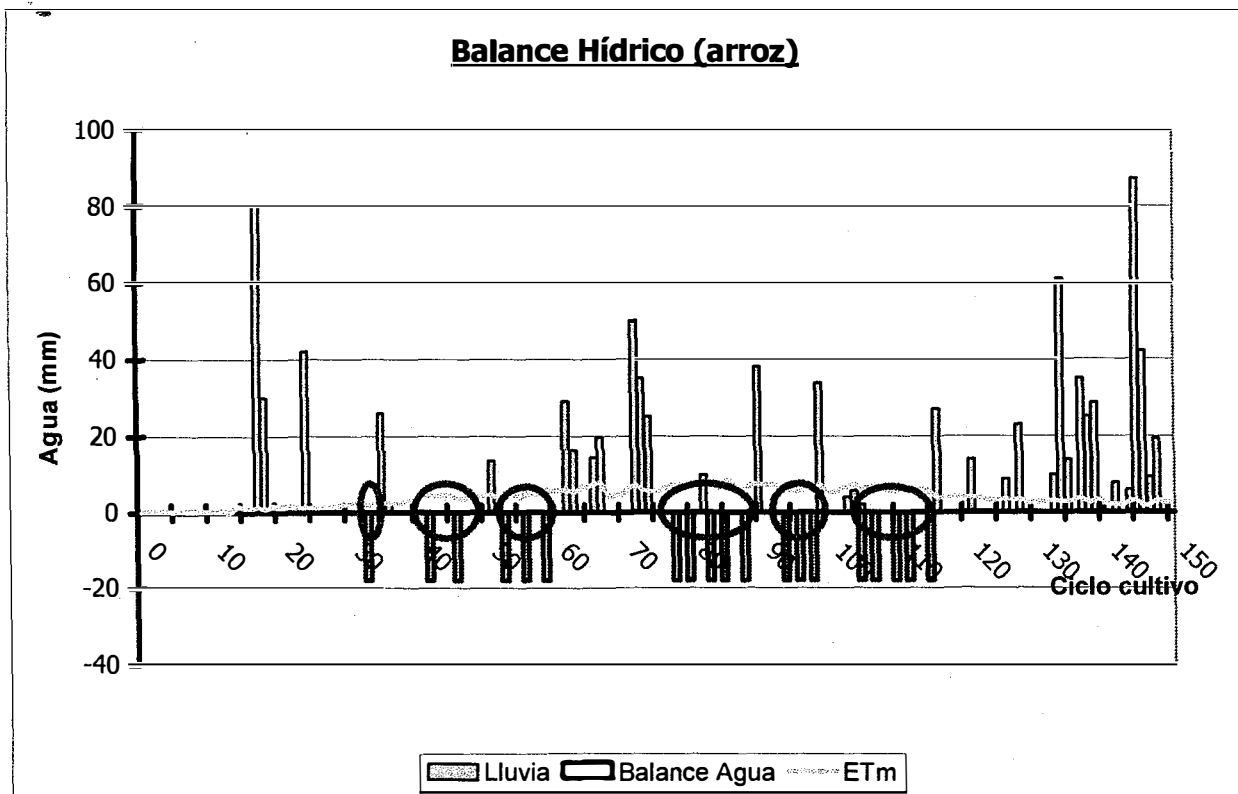
- Se comenzó evaluando las ineficiencias y pérdidas de agua. El objetivo es minimizarlas en la medida de lo posible y prever esa agua ineficiente en caso de NO poder eliminarlas. Se pretende aportar la lámina que ET el cultivo con el riego y gastar aparte de la ET del cultivo, la porción de agua generada por las ineficiencias del sistema (evaporación directa de agua en lagos, canales y chacras, infiltración en canales, etc.)

- El control de malezas se efectúa con el uso correcto de herbicidas (producto, dosis y momento debidamente seleccionados), asegurando con

el riego una alta tasa de crecimiento del cultivo de arroz para que cubra rápido el suelo.

3. Cultivo de arroz, 06/07:

- Un cultivo sembrado en octubre, con fecha de emergencia del 8 de octubre presentó una ET de 642mm (estimación de UFSM)
- La lluvia en el período fue de 840mm
- Se aplicaron 1.320mm de lámina de riego (incluye aparte del agua que se entregó en la chacra, las ineficiencias de conducción, evaporación directa en el lago de la represa y canales y el escurrimiento en la chacra)
- En el gráfico siguiente (Balance Hídrico, arroz) se muestra como a pesar de lluvias suficientes durante el ciclo de cultivo (casi 200 mm más de lo que evapotranspiró el cultivo), el déficit de agua fue notorio, debiéndose regar unos 360mm.



➤ Ganadería

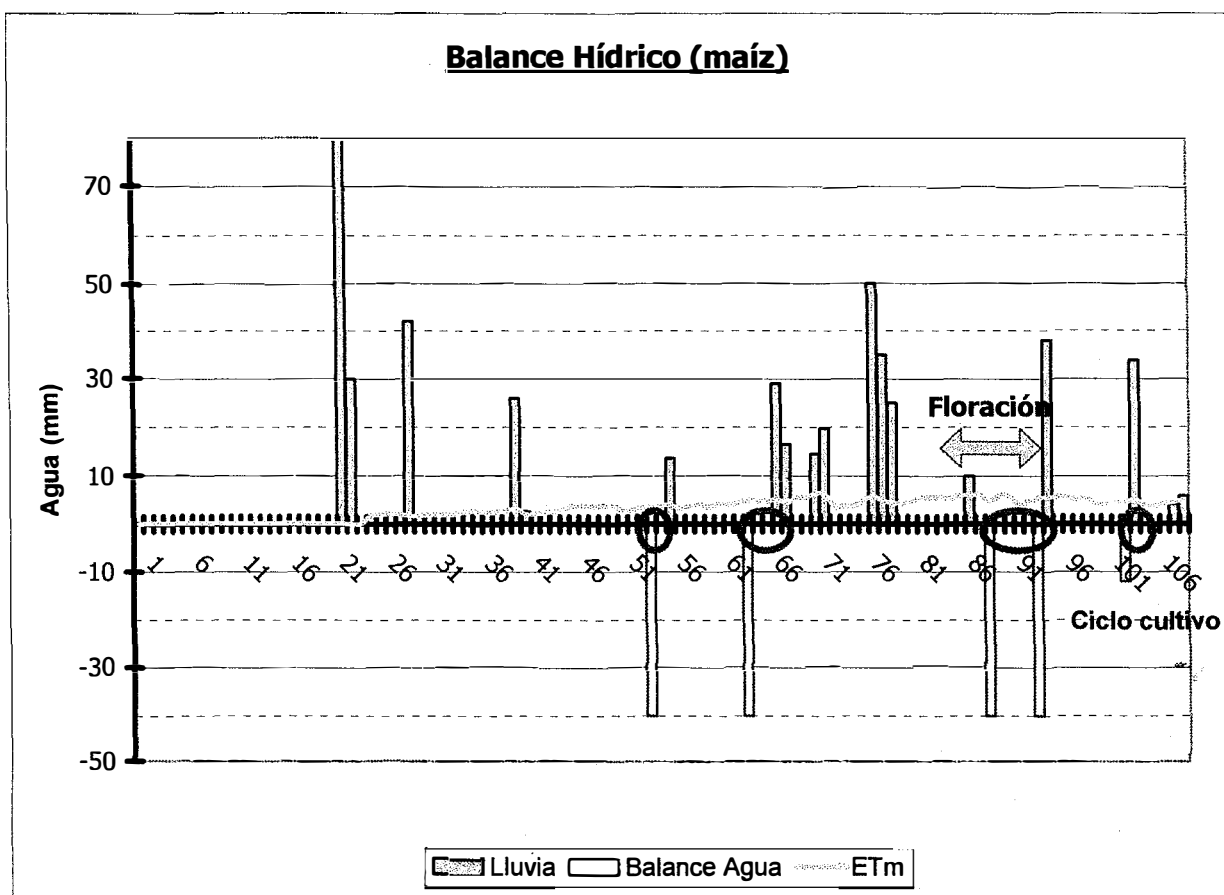
• La ganadería es el rubro más sensible en cuanto a la incertidumbre de disponibilidad de agua y/o registros de lluvia. En líneas generales la producción de forraje en invierno es algo más estable la haber especie invernales adaptadas y de buen aporte forrajero. En el verano, la producción ganadera se basa en la dilatación de exceso primaveral. La erraticidad de lluvias, escaso volumen de agua almacenado en el perfil de suelos y las altas demandas atmosféricas hace que predominen los años con déficit hídricos por períodos prologados o bien con déficits puntuales que dependiendo del ciclo de las pastura o cultivo pueden afectar sensiblemente la producción.

• La incorporación del riego en este rubro estabilizar la producción ganadera, viabilizando la diversificación de la empresa. Se presentan a continuación ejemplos concretos de la disponibilidad de agua para distintos cultivos registrados en la

empresa en zafras anteriores generados gracias al servicio de riego de INIA Las Brujas y el convenio de ésta con la UFSM.

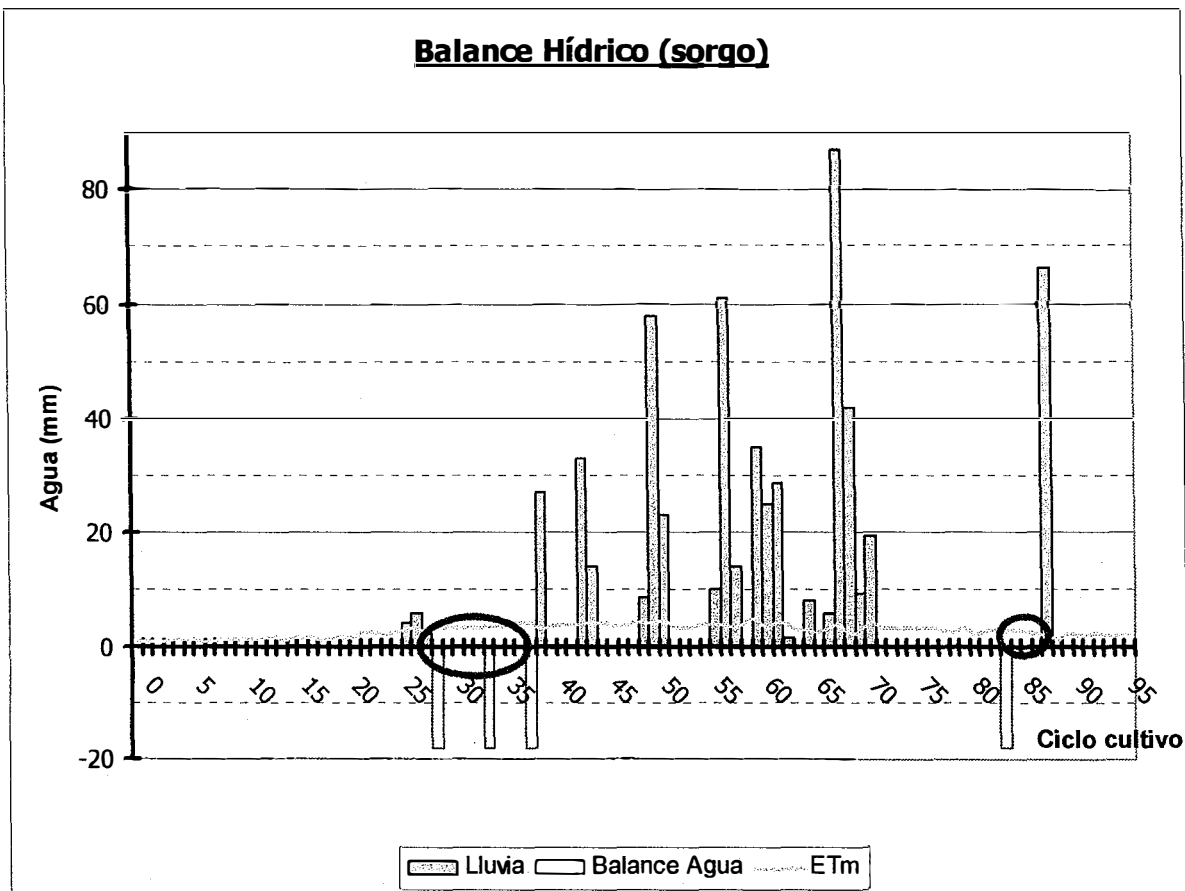
1. Maíz

- El objetivo de este cultivo es suministrar alimento para engorde de novillos, bien cosechando grano o la planta entera. La zafra 06/07 se sembraron 250 ha de maíz para cosechar como planta entera.
- La emergencia del cultivo (promedio del área) fue el 8 de octubre.
- El cultivo durante los 110 días que se controló evapotranspiró 352mm.
- Durante el mismo período se registraron 476 mm de lluvia, suficiente como para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo.
- Sin embargo el balance hídrico en el suelo determinó 4 períodos (corresponde a períodos de una semana cada uno) con déficit marcados de agua disponible en el suelos para asegurar óptimo desarrollo del cultivo. La recomendación de riego fue de 360 mm (la misma tiene en cuenta la eficiencia de 70% en conducción y distribución de agua).
- Se grafica a continuación para todo el ciclo del cultivos, las lluvias registradas que aportaron agua al suelo (barras +), la ET del cultivo y los déficits generados. Uno de ellos coincidió con le período crítico del cultivo (floración).



2. Sorgo

- Cultivo con destino a grano para engorde de novillos (grano húmedo). La zafra 06/07 se sembraron 400 ha de sorgo, de las cuales se regaron 90ha.
- La emergencia del cultivo (promedio del área) fue el 28 de diciembre y muy mala, se tuvo que resembrar un % importante del mismo por la mala implantación consecuencia de las lluvias noviembre y diciembre.
- El cultivo durante los 90 días que se controló evapotranspiró 268mm.
- Durante el mismo período se registraron 589 mm de lluvia.
- Sin embargo el balance hídrico en el suelo determinó 2 períodos con déficit marcados de agua disponible en el suelos para asegurar óptimo desarrollo del cultivo. La recomendación de riego fue de 145 mm.
- Se grafica a continuación para todo el ciclo del cultivos, las lluvias registradas que aportaron agua al suelo (barras +), la ET del cultivo y los déficits generados.



3. Praderas

- Las pasturas sembradas tiene como objetivo aparte de suministrar forraje, tb. cosechar semilla.
- No se realizaron registros de ET en la zafra pasada.
- Si se tiene estimaciones en base a registros de la UFSM:
 - Considerando un exploración radicular de 40cm del perfil de suelos, hay una capacidad de almacenamiento de agua según caracterización realizada en los suelos de 87mm. De estos solo

50mm estarían disponibles sin ocasionar stress a las plantas (sin restricciones de crecimiento).

➤ La ET media en verano (condiciones normales y máximo crecimiento) se del orden de los 5mm por día. Esto determina un almacenamiento de agua en el suelo para períodos de 10-12 días.

➤ Una pradera para lograr un máximo crecimiento en verano requiere en el orden de 30mm por semana, esto determina una necesidad de 45 mm de lluvia semanal (teniendo en cuenta lo que escurre en cada lluvia y NO infiltra).

3. METODOLOGÍAS DE RIEGO

➤ Tipos de riego y características destacables:

1. Superficial

- DSC ha desarrollado conocimiento y ajustado las técnicas de riego (con la colaboración de INIA, UFSM, revisiones inf. internacional, etc) en el cultivo de arroz.

- Demanda mucho trabajo (técnico en seguimiento, controles & personal (RRHH) para ejecución de actividades). Es poco "automatizado" y hay que hacer un permanente seguimiento.

- Variabilidad de resultado (dificultada en asegurar gastos de agua y ajustar "timing" (momento del riego con necesidad cultivo)) por falta de técnicas ajustadas localmente.

- Inversión compartida con riego arroz (es la misma), NO se necesita inversión extra

- Amplias opciones de riego (cultivos) y lugares (tierra por debajo de canales de riego)

- Fácil implementación (implementos necesarios son los mismos que para el arroz)

2. Aspersión

- Hay poca experiencia en la empresa.

- Inversión en Equipos es alta.

- Simplicidad en el manejo, bajo requerimiento de RRHH

- Uno o dos módulos por equipos (abracan poca área)

➤ OBJETIVO del RIEGO

- Ajustar gasto de agua de cada sistema con ETP del cultivo a regar (incluyendo ineficiencias controladas o minimizadas). Esto se debe llevar a cabo con criterios de alta eficiencia en el uso del agua por el alto costo de este recurso y mayores "costos" ante el uso incorrecto del mismo (erosión de suelos, escurrimientos, etc.). ES imprescindible contar con personal debidamente capacitado y consiente de lo que está manejando.

- En la implementación de un sistema de riego se tiene en cuenta:

1. Cultivo a regar y la demanda de agua. Se inicia con una base teórica de la ET para diseñar el sistema y luego con el monitoreo se ajustan los gastos a la ET de la zafra. El servicio que brinda INIA Las Brujas con la UFSM, permite estimar diariamente la ET de cada cultivo en base a los datos climatológicos locales que son enviados vía Internet a la UFSM se determina la ET diaria y se hace la recomendación de riego. El crecimiento del cultivo se monitorea periódicamente para ajustar el modelo de crecimiento con la realidad y obtener datos precisos de ET.

2. Caracterizar suelo a regar. Es parte del servicio de riego. Mediante el método de doble anillo se determina la infiltración básica. Los datos en los suelos

del establecimiento van de 2 a 10 mm/hr de infiltración básica. Este dato es importante en el diseño de los sistemas y/o para mejorar sistemas "viejos". A modo de ejemplo se presenta la caracterización de la chacra de maíz:

Curva característica de agua en el suelo

Contenido volumétrico de agua en el suelo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) a diferentes tensiones de agua.

Tensión de agua en el suelo (cm de H_2O)	Profundidad de suelo (cm)		
	0-20	20-40	40-60
0	0,5069	0,4474	0,5179
30	0,4391	0,4456	0,5123
1000	0,3843	0,4197	0,4890
5000	0,3586	0,4145	0,4805
15000	0,3333	0,3897	0,4547

Claudio García

3. Medir los gatos de agua en los canales y represas.

✓ Con la información recaba de suelos, cultivo, gastos, etc. se define el sistema de riego apropiado. Este varía según el cultivo y método de cosecha, suelos, topografía, etc.

➤ Metodología de riego empleada

• Arroz,

1. El método de riego es la inundación intermitente. El arroz es el cultivo que permite disponer de agua para regar otros cultivos o pasturas en verano. Se pretende implementar un método que minimice las pérdidas de agua. Se trata de evitar el escurrimiento superficial y minimizar la percolación profunda.

2. Es imprescindible controlar los gastos en todo momento y medir los caudales. Las chacras deben estar sistematizadas correctamente teniendo en cuenta los objetivos de riego y los aguadores debidamente entrenados.

3. Se están implementando parcelas pequeñas a modo de melgas testigo o referencia donde se hace un seguimiento detallado empezando por mapeos, medición de áreas (unidades de riego), caudales dentro de la melga, tiempos de aplicación de lámina, etc. para que sea el área de ensayo y ajuste de cada aguador y mejorar el manejo del resto del área.

• Maíz & Sorgo

1. El método de riego es por fajas (Border Strips).

2. Para el Maíz en concreto, se estimó la demanda con el programa de la FAO Cropwater.

- Dependiendo de la fecha de siembra y considerando los registros climáticos de INIA Salto Gde. (registros de 30 años) la demanda sería de 320 a 350 mm de riego a intervalos de 5 días.

- Teniendo en cuenta las características hidráulicas del suelo, topografía y necesidades de agua, se definió una sistematización de:

- ✓ Fajas de 12 mts de ancho
- ✓ Largo de fajas de 70 mts
- ✓ Pendiente máxima (pendiente del terreno de 1,1 a 2%)

3. Se determinó las características de avance del agua antes de la siembra

- Q de cada faja & tiempo de riego (se determina la L mm)

- $Q_{\min} = (0.000357 \times L \times S_{0,5}) / 10$
- El riesgo de erosión es BAJO.
- 4. Las conducciones de agua interna (dentro de la chacra) se hacen por medio de regaderas.
 - Regaderas Principales
 - Se marcan sin tener en cuenta la pendiente, y se prioriza que abastezca correctamente en tiempo y forma a las regaderas secundarias. Se controla la erosión con bolsas, mangas, etc.
 - Regaderas Secundarias
 - Son las que entregan el agua a las fajas
 - $S = 1$ por mil
 - Distancia entre regaderas = 70 mts,
 - Ancho = ± 2 mts
 - Altura de la pierna = ± 0.3 mts
- 5. Caudal de agua que ingresa a cada faja.
 - 7-10 lts/seg (0.58 – 0.83 lt/mt de ancho de faja)
 - Tiempo de riego por faja, 80 minutos
 - Se aplica con este criterio una lamina de 40 mm
 - En este tiempo se debe haber alcanzado el 70 % del largo de la faja, el 30 % restante se riega con el agua que va bajando de la faja.
- 6. Distribución de recursos humanos
 - 1 canalero (se asegura de entregar el mismo caudal a cada faja y por lo tanto a cada regador), este mismo es el que controla que el agua se esté distribuyendo correctamente (uniformidad) en la faja. También es el que indica el cambio de faja al llegar el tiempo.
 - Regador (este se asegura de distribuir correctamente el agua en el área asignada)
 - Herramientas: Aforadores, asadas, pala de corte
- Praderas
 1. El método de riego es por melgas o taipas, en definitiva una combinación de arroz (taipas) & maíz (fajas).
 2. Se construyen taipas de más de 20 cm de altura a un intervalo vertical de 25-30 cm.
 3. La taipa se usa a modo de regadera y almacena agua hasta que empieza a desbordarse. En ese momento el aguador "boquetea" la taipa cada 7-10 mts y deja bajar el agua de manera precipitada y esta NO avanza en sentido de la pendiente sino que también perpendicular a la misma logrando un correcto mojado.
 4. El objetivo es regar de una manera sencilla el 70-80% del área de la pradera.

4. RESULTADOS DE CAMPO

Resultados internos de chacra a nivel comercial. Para caracterizar el la zafra pasada se muestran los registros de lluvia de la misma:

Registro de lluvias Zafra 2006/07				
Mes	Década	Lluvia (mm)	Total mes (mm)	Total año (mm)
Octubre	1	47	189	1151
	2	22		
	3	120		
Noviembre	1	46	76	
	2	29		
	3	1		
Diciembre	1	14	241	
	2	116		
	3	112		
Enero	1	48	94	
	2	34		
	3	11		
Febrero	1	41	208	
	2	32		
	3	135		
Marzo	1	202	345	
	2	52		
	3	91		
Total anual (mm) :			1151	1151

➤ Resultados riego en cultivos de Arroz

- Registros históricos de gastos de agua con chacras con riego controlado (+/- Inundación intermitente vs. riego sin control o tradicional)
- Resultados de tesis de riego (gastos de agua y rend.)
 1. 05-06 (Marela, Motta)
 2. sin publicar 06/07 (Henderson, Gussoni, Moor)

Se obtienen ahorros significativos de agua en el riego de arroz al NO inundar permanentemente la chacra. El ahorro ronda los 2 a 3.000 m³/ha (L = 300mm). Se logra como beneficio colateral, pero muy importante minimizar el escurrimiento y pérdidas de agua. NO se han detectado mermas significativas en el rendimiento. Es de tener en cuenta que este sistema es menos sensible a errores en la distribución de agua.

➤ Resultados riego en Maíz (gastos de agua y rend)

1. zafra 05/06 (180 has)

- Se regaron 180 ha de maíz para cosecha de planta entera.
- Llovieron 275 mm durante el ciclo del cultivo
- La ET medida fue de 585mm
- SE generó un déficit hídrico de 360mm de agua
- Se aplicó (riego) 431mm

- Se cosecharon en promedio 33.000 kg/ha de planta entera incluyendo un área sin riego que rindió 19.300 kg/ha. Hay registros de melgas regadas con rendimientos de 38 a 41.000 kg/ha.

2. **zafra 06/07 (252 has de maíz con riego):**

Se presenta información detallada de este cultivo

- Manejo agronómico:
 - Fertilización al voleo previa a la siembra, 100 kgs/ha 7-40-0 Incorporado con una disquera
 - Siembra 12 de Octubre
 - Fertilización basal 130 Kgs/ha 18-46-0
 - Re- Fertilización 125 Kgs/ha UAN (37 UN) a 8 hojas y 80 Kgs/ha Urea (37 UN) a floración
- Información del cultivo:
 - Emergencia promedio: 20 de Octubre
 - Stand de plantas Promedio= 81,809 pl/ha, Máximo= 97,619 pl/ha, Mínimo= 71,429 pl/ha
 - Floración 29 de Diciembre
- Costos de cultivo

Concepto	U\$S / Ha		%	
Disquera (2 pasadas)	26		4%	
Herbicidas (2 aplicaciones)	4		1%	
Fertilizantes	12		2%	
Siembra	34	446	6%	76%
Cosecha & Secado	109		19%	
Semilla	80		14%	
Fertilizantes	155		26%	
Agroquímicos	27		5%	
Sistematización	68		12%	
Riego	36	141	6%	24%
Costo Agua *	37		6%	
	588	588	100%	

* Agua 1/3 Costo arroz
(8,5u\$ x 13bols)

- Detalle costos sistematización para riego

Concepto	Recurso	Ha / hr	U\$S/hr	U\$S / Ha	
Fajas	Taipera, 2 pasadas + 3 operarios	3,5	51,5	15	
Regaderas	Excéntrica + pala cola, 2 pasadas c/u	2,0	84,0	42	68
Apronte riego	Traíllas	4,0	46,0	12	
Riego (RR. HH)	Aguadores (10 ag.)				
	1 Aguador 4,2 ha/día	0,42	1,9	36	36
	8 riegos o baños en ciclo (>500mm)	10		104	104

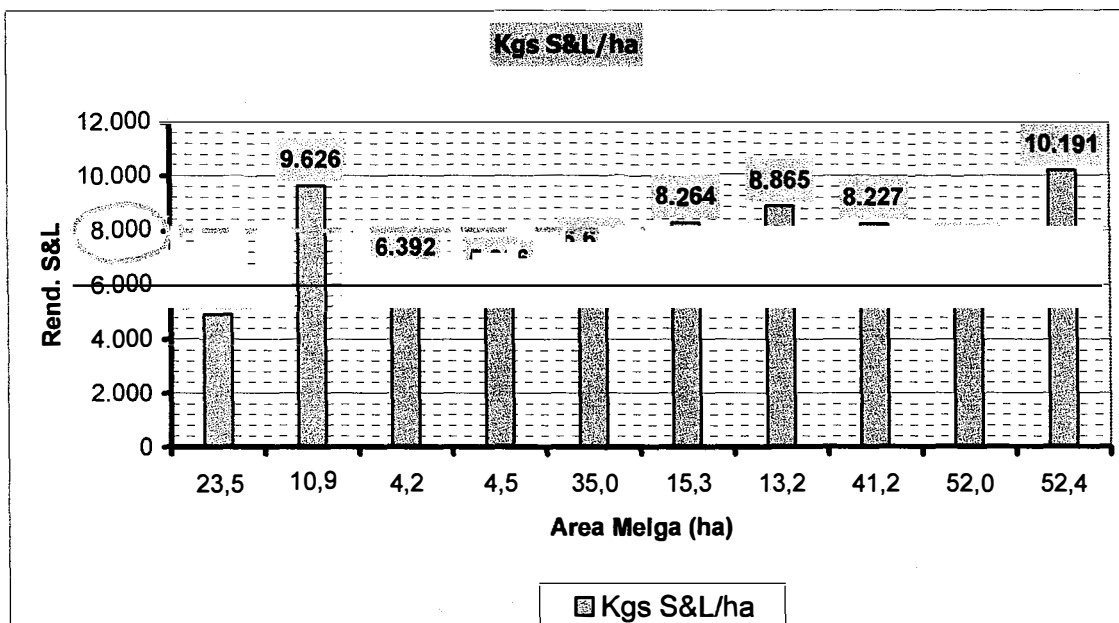
▪ Indicadores de riego

Indicador	Promedio	Mejor desempeño	Obj.
Área Riego (ha)		250	
Días de riego (1 "baño")	32	12	6
ha / día	8	21	42
Caudal (lts/seg)	95	180	340
Caudal (lts/seg/faja)	10,2	7,3	6,9
Caudal (lts/seg/aguador)	19	22,5	34
Caudal (lts/seg/ha)	0,4	0,7	1,4
Nº Regadores / día	5	8	10
Área por regador (ha)	50	31	25
Área por regador / día	1,6	2,6	4,2
Regadores / ha	0,02	0,032	0,04
Fajas/regador/día	19	31	50
Fajas / día	93	248	496
Eficiencia de riego	38%	54%	60%
mm aplicados	104	74	71
Gasto de agua (m³/ha)	3.640		ET + 60%

En líneas generales los indicadores de riego NO fueron como se pretendía. El objetivo era regar con una eficiencia del orden del 60% (L requerida/ L aplicada). En promedio se aplicó 104 mm por riego debiéndose aplicar tan solo 40mm. La causa de esto como se puede ver en el cuadro anterior al comprar la columna promedio con la del objetivo de riego se explica por NO haber logrado el caudal de diseño 34 lts/aguador y se regaba con tan solo 19 lts/aguador. Tampoco se pudo contar con un grupo de 10 aguadores como estaba planificado.

▪ Rendimientos físicos

Nº Riegos	Melga	Kgs Verdes	% Hum	% Bas	Kgs S&L/ha
0	23,5	125.000	18,0%	2,0%	4.913
0,5	10,9	111.420	16,4%	2,0%	9.626
1	4,2	29.065	18,0%	2,0%	6.392
1	4,5	29.065	18,0%	2,0%	5.966
1	35,0	248.810	16,6%	2,0%	6.678
1	15,3	136.670	17,9%	2,0%	8.264
2	13,2	131.000	20,7%	2,0%	8.865
2	41,2	369.200	18,5%	2,0%	8.227
2	52,0	377.550	20,6%	2,0%	6.498
3	52,4	578.110	18,0%	2,0%	10.191
	252	2.135.890	17,9%	2,0%	7.832



Se ordenaron las melgas (identificadas por el área de c/u) según la cantidad de riegos aplicados. Hay una clara tendencia de aumento del rendimiento al aumentar la cantidad de riegos, más allá de la dispersión de los datos. Se puede ver claramente como la melga de 23.5ha que NO tuvo riegos rindió menos de la mitad de la melga 52.4 (la más gde. en área) con 3 riegos. Hay 5.200 kg S&L de diferencia entre una y otra. Las melgas que tuvieron dos riegos rindieron en el orden de los 8.000 kg/ha de grano.

A modo de destaque se puede observar:

- ✓ La necesidad y respuesta al riego inclusive en un verano llovedor
- ✓ La posibilidad de ajustar la metodología de riego en busca de mejorar la eficiencia. Hay melgas que con muy poco riego respondieron significativamente dado que se logró regar la cantidad de agua necesaria, en el momento oportuno y correctamente distribuida en TODA la melga.

➤ Resultados riego praderas (05/06 en 2 melgas regadas).

- Datos aprox. de gastos de agua
- Gasto de agua excesivos (generalmente se toma la decisión de regar con el suelo MUY seco), 250 mm por baño
- En todos los casos se **aseguró persistencia plantas durante seca** 05-0 además de lograr 2 pastoreos y una **rápida re-implantación** en feb. (otoño temprano con las lluvias, banco de semilla)
- Costos:
 - Sistematización: 45 u\$/ha
 - Riego (aguadores): 30 u\$/ha
 - Agua : NO se reserva agua para este fin al inicio y se destina agua de lluvia que escurre durante el verano
 - TOTAL COSTO RIEGO: 75 u\$/ha + agua

➤ Resultados riego Sorgo 06/07

- Costos riego
 - Sistematización: 65 u\$/ha
 - Riego (aguadores): 28 u\$/ha
 - Agua : 37 u\$/ha
 - TOTAL RIEGO: 130 u\$/HA
- Indicadores de riego de Sorgo:

Indicador	Promedio	Mejor desempeño	Obj.
Area Riego (ha)		90	
Días de riego (1 "baño")	6	6	6
ha / día	15	19	15
Caudal (lts/seg)	130	130	92
Caudal (lts/seg/faja)	7,3	7,0	7,0
Caudal (lts/seg/ha)	1,4	1,4	1,0
Nº Regadores / día	4	4	4
Área por regador (ha)	22,5	23	23
Área por regador / día	3,8	4,8	3,8
Regadores / ha	0,04	0,04	0,04
Fajas/regador/día	45	45	45
Fajas / día	179	179	179
Eficiencia de riego	47%	59%	70%
mm aplicados	75	59	50
Gasto de agua (m ³ /ha)	1.450		Necesidad de agua + Ef. Sist.

Los gastos de agua en líneas generales se ajustaron a los objetivos lográndose valores razonables de eficiencia del uso del agua.

- Rendimientos
 - 3.620 kg/ha
 - Merms por exceso lluvia fin de feb-mar.

5. DEMANDAS & NECESIDADES

- Ajustar tecnologías & métodos de riego a aplicar en cada situación.
 - Capacitación de técnicos & personal para lograr un uso eficiente del recurso agua y maximizar los beneficios del uso de esta herramienta (el riego).
 - Ajustar metodologías a las condiciones locales según
 - Tipo de suelos
 - Topografía
 - Control de malezas & fertilización al nuevo escenario (con disponibilidad de agua suficiente). Ante este nuevo ambiente, la problemática de estas variables cambia, por lo que hay que adecuar el paquete tecnológico de insumos que se emplea habitualmente a esta nueva situación.