

PROPUESTA DE SISTEMATIZACIÓN AGROHIDROLÓGICA EN CUENCAS DE LLANURA CON ÉNFASIS PREDIAL Y CONSORCIADO

DAMIANO, F.¹; PARODI, G. N.²; TABOADA, M. A.^{3,4} & PRIETO GARRA, D.⁵

RESUMEN

Existe escasa tecnología para el manejo de aguas superficiales en áreas de planicie extrema e inundable, aumentada por la controversia de opinión en cuanto al modo de encarar la solución de los excesos y déficit hídricos. La Agrohidrología modular considera el importante rol que cumple el agua en el sistema de producción, manejándola mediante un conjunto de prácticas conservacionistas rurales, de ingeniería agronómica y civil destinadas a controlar los anegamientos periódicos en campos bajos o en llanuras extensas. La unidad agrohidrológica básica es el diseño de “circuitos hidrológicos” que evita la transferencia anárquica de agua a otras unidades, circuitos o sistemas hídricos, mediante un conjunto de obras estructurales de encauzamiento, conducción, retención, expansión y evacuación. Estableciendo un marco hídrico y edafológico apropiado para acumular los excedentes de agua en sectores menos productivos, protegiendo ambientes con riesgo de hidromorfismo y halomorfismo y su reincorporación a los esquemas agronómicos productivos.

Palabras clave: región pampa inundable, sistema hidrológico no típico, circuitos hidrológicos, estructuras de tierra.

ABSTRACT

Proposal for agro-hydrological systematization in basins plaines with emphasis predial and consortial.

Available and technology for surface water management in such large plains is still scarce or site-specific. Controversy often arises about how to find the best solution to manage alternated periods with water excesses and droughts in the same area. The best technical solution is “agro-hydrology”, which can be considered a “conservation / interventionist” approach attempting to

1. Instituto de Clima y Agua, CIRN, INTA

2. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, Enschede, Países Bajos.

3. Instituto de Suelos, CIRN, INTA.

4. CONICET

5. Estación Experimental Agropecuaria, INTA, Santiago del Estero.

Manuscrito recibido el 20 de octubre de 2016 y aceptado para su publicación el 7 de febrero de 2017.

F. Damiano *et al.*

manage the soil-plant-atmosphere system. The concept here proposed is water management in lowlands using “hydrologic circuits” capable of temporarily storing great water volumes to retard downstream evacuation. This requires the design and engineering calculation of different earth structures for captation, conduction and temporal storage of excess water, using combined “engineering-rural” management. This solution attempts to cope the typical climatic alternation of the flooding Pampa region: floods and droughts occurring in subsequent seasons, and both related to groundwater and soil salinization processes in this region. Water management by agrohydrology can be then regarded as a first step before the implementation of classical soil reclamation techniques in large plains.

Key words: flooding Pampa region, atypical hydrological system, hydrologic circuits, earth structures.

I. Cuenca hidrológica: planificación territorial y manejo del agua

¿Qué es una cuenca superficial?

El término cuenca superficial imbrífera, cuenca de drenaje o simplemente cuenca son distintas denominaciones de la porción de territorio que drena hacia un punto (salida o exutorio). La cuenca actúa análogamente a un embudo en el que el agua que ingresa en forma de precipitación escurre superficialmente a un único punto de salida. El límite de una cuenca superficial, llamado divisoria de aguas, está determinado por el relieve del área que la separa topográficamente de las otras cuencas adyacentes.

La cuenca hidrológica incorpora las aguas subterráneas y se define como la unidad territorial donde las aguas superficiales y subterráneas forman parte de un ciclo hidrológico común donde la diferencia entre los caudales de aguas entrantes y salientes en un tiempo establecido es igual a la variación del volumen de agua en esa unidad. Esta relación queda expresada a través de un balance hídrico.

¿Qué es manejo de cuencas?

La filosofía del manejo de cuencas (watershed management) es establecer estructuras y estrategias destinadas a regular la descarga de agua de una cuenca hidrológica. El objetivo es alterar algunas o todas las variables que componen el balance hídrico antes mencionado. En áreas con excesos de agua se busca incrementar la retención de agua en los suelos, análogamente a una esponja, y así disminuir la salida de agua en cantidad, incrementando el tiempo de permanencia en la cuenca, que trae asociado una variación en la calidad del agua y un aumento de la evaporación. Se reduce de esta manera el escurrimiento rápido, causante de inundaciones, en favor de un aumento del flujo subsuperficial. Por el contrario en áreas con déficit de agua, se busca impedir la infiltración del agua para poder captarla y retenerla en algún receptáculo. En todos los casos estos objetivos se orientan a la utilización de la cuenca como almacenadora (catchment area) de agua para diferentes fines, como consumo humano (cuencas municipales), rural e industrial y para reducir el impacto de las crecidas protegiendo así zonas vulnerables

aledañas a los cauces. La degradación de la calidad del agua por el uso y desechos químicos de diverso origen se ha incrementado exponencialmente en los últimos años. Los proyectos más recientes de manejo de cuenca enfatizan cada vez más la necesidad de mejorar la calidad del agua y no sólo la cantidad y el tiempo de retardo.

¿Cómo evolucionó conceptual el manejo de cuencas?

A partir de la década del '90 se comienza a hablar de desarrollo sustentable y visión ecosistémica. Existen enfoques que requieren de organización y participación social en la solución de problemas comunes. Se presenta a la cuenca como un espacio idóneo donde interactúan los sistemas físico-bióticos y socio-económicos. Sin embargo, en el ámbito nacional subsisten y evolucionan dos enfoques de opinión diferentes, que evolucionaron a partir de la existencia de entidades de misiones disímiles en cuanto a la aplicación de las políticas hídricas y del desarrollo sustentable. Desde el ámbito de competencia de las políticas hídricas y estructuras hidráulicas (Subsecretaría de Recursos Hídricos, Instituto Nacional del Agua), las cuencas representan el área de captación y convergencia del agua, donde prevalece un enfoque sustentable en el conocimiento del sistema hidrológico, el uso orientado a diversos clientes y la administración sustentable del agua. Se visualiza a la cuenca como la unidad de gestión integrada del agua, ya sea de una misma jurisdicción o interjurisdiccionales (2). La institucionalizan a través de organismos de cuencas, efectivizan la coordinación intersectorial e interjurisdiccional por el uso del agua y la organización de sus usuarios, así como la vinculación de éstos con la autoridad hídrica provincial o nacional.

Desde el ámbito de competencia con la conservación y uso sustentable de los recursos naturales, la misión del INTA sostiene el manejo del territorio tomando a la cuenca como unidad natural para la planificación y gestión participativa, construida desde lo micro a lo macro, incorporando las consideraciones ambientales, económico-productivas, de identidad sociocultural y de protagonismo de los actores involucrados en el desarrollo. El enfoque integral y conocimiento sistémico de la cuenca sirve de referencia para proyectar el desarrollo sustentable regional, como así también la determinación del impacto ambiental del cambio de uso del suelo y la variabilidad climática. En general, la calidad y cantidad de agua representan importantes indicadores del estado de conservación de la cuenca.

Los alcances de manejo de cuencas evolucionaron de ese enfoque originalmente orientado puramente a la captación hacia otros niveles más complejos como los de protección de recursos naturales, mitigación del efecto de fenómenos naturales extremos (inundaciones y sequías), los de control de erosión hídrica, el control de la contaminación, y luego conservación de suelos, rehabilitación y recuperación de zonas degradadas por procesos de hidro-halomorfismo.

II. Sistemas hidrológicos en paisajes ondulados y en llanuras

Para caracterizar los conceptos de conservación y manejo del agua en los tipos de paisajes genéricos, el Cuadro 1 presenta comparativamente las características que rigen el movimiento del agua en paisajes ondulados con pendiente (sistema hidrológico típico) y llanura plana (sistema hidrológico no típico).

Cuadro 1. Comparación de parámetros y condiciones físicas e hidráulicas en relieves contrastantes.

Condiciones, parámetros o propiedades	Paisajes	
	Ondulado	Llanura
Pendiente del terreno	Mayor a 0,5 %	Menor a 0,1 %
Superficie tributaria de aportes de agua	Circunscripta por el terreno y definido como cuenca	Mejor definida por el volumen de entrada de agua al sistema
Punto de descarga (salida)	Único	Múltiple
Energía hidráulica	Media a alta (erosiva)	Baja a muy baja (sedimentación)
Sistema de drenaje	Organizado, jerarquizado y dominado por la pendiente	Anárquico, en general dominado por la pendiente, pero afectado por otros factores (viento, cantidad de agua acumulada, factores antrópicos)
Volúmenes de escurrimientos de agua (medidos a la salida del sistema)	Importantes (como referencia, hasta 30% del total de agua caída)	Poco importantes (como referencia, hasta 5% del total de agua caída)
Almacenamiento en superficie	Según geomorfología y litología entre escaso y medio	Alto a muy alto en paisajes de deflación
Movimientos de agua verticales (infiltración y evaporación)	Importantes	Predominantes
Acción antrópica	Excepto en obras de magnitud, tiene relativamente un impacto limitado en el movimiento general del agua	Mucho impacto en el escurrimiento del agua, aún con estructuras de poco porte
Tiempo de respuesta de la cuenca a un estímulo pluvial. (Se asume idéntica superficie)	Corto	Prolongado
El/los punto/s de descarga ante un estímulo pluvial	Rápido, proporcional y en fase	Lenta o puede no haber
Dirección de escurrimiento	Siempre siguiendo el gradiente de pendiente del terreno.	No siempre en la misma dirección, depende del estado del sistema, de la característica del estímulo y a veces de otros factores como el viento.

La escuela de la hidrología clásica desarrolló toda su metodología preferentemente en áreas entre onduladas a montañosas. Tales métodos están basados en el principio universal de conservación de masas, es decir, se define una cuenca donde el agua de escurrimiento interviniente en el cálculo del balance hídrico solo puede ser evacuada horizontalmente por la única salida que dispone.

En áreas de planicie, la definición de cuenca es un concepto relativo puesto que el sistema no funciona con traslaciones de aguas conducidas por medio del drenaje jerárquico, sino que las precipitaciones provocan expansiones y transvasos entre áreas

bajas aledañas. De tal forma “la cuenca” no es única sino que es una función del mecanismo mismo de expansión. El tratamiento de un área de estas características con la metodología anterior, obligaría a una partición de la cuenca en microsubcuencas que se comporten como pseudo-independientes obligando a “transformar” el área plana en un área energéticamente más activa. El problema de esta transformación es que los enlaces entre las microsubcuencas varían en función del estado hídrico de las mismas más que de la geomorfología del lugar. Eso degrada la capacidad de la hidrología tradicional que tiene su sustento matemático en formas y pendientes.

La aplicación de metodologías tradicionales conduce a una solución que para las inundaciones se resume en, “sacar el agua lo más rápido que sea posible”, independientemente de los efectos que esto pueda tener aguas abajo. Por el contrario, el mecanismo o sistema que pretenda controlar los anegamientos en la planicie deberá respetar los procesos básicos que son naturales de la llanura. Es aquí donde la agrohidrología tiene su campo de acción, a través de un diseño ingenieril rural que puede controlar y manejar los enormes volúmenes de agua de baja energía, demorándolos considerablemente de forma de liberarlos de ser necesarios en momentos donde el pico de crecida ha pasado.

III. Aspectos agrohidrológicos básicos y modelo conceptual

En todo sistema hídrico de cualquier clase hay dos principios físicos que rigen el esquema de movimiento de agua: el principio de conservación de masas y el principio de conservación de la energía. En hidrología, en general, se utiliza el primer principio para la solución de los problemas y en la hidráulica aplicada se opta por la aplicación de ambos principios.

El principio de conservación de masas establece que la masa de un cuerpo (léase volumen del agua en estudio) se preserva; puede fluir de un ámbito a otro del sistema, puede inclusive salir del sistema para incorporarse al medio, pero el total de ese volumen almacenado y en movimiento es único y no cambia. Este principio se expresa matemáticamente de muchas formas, dependiendo del problema bajo estudio. En el caso de control de anegamientos, la expresión más común es la ecuación del balance de aguas (1):

$$Q_e \cdot \Delta T - Q_s \cdot \Delta T = \Delta V \quad (1)$$

En palabras, la cantidad de agua que ingresa al sistema (Q_e [m³/s]) en un cierto tiempo (ΔT [s]) menos la cantidad de agua que sale del sistema (Q_s [m³/s]) es igual a la variación del volumen del agua dentro de ese sistema (ΔV [m³]) en el tiempo considerado.

Los caudales de ingreso o egreso, multiplicados por el tiempo considerado son los volúmenes de agua ingresante y egresante del sistema. Haciendo una generalización muy utilizada en hidrología donde se asume que los volúmenes de agua fluyen (o efluyen) uniformemente dentro del área [m²] que ocupa el sistema, la ecuación anterior se puede dividir por esa área en los dos miembros para así expresar la ecuación en [mm] de altura de agua.

Desagregando al sistema en sus componentes de balance diremos que los volúmenes entrantes (favorecen el anegamiento) al sistema son:

* Precipitaciones (R), una entrada vertical.

* Entrada de aguas del medio externo que pueden ser superficiales o subsuperficiales (genéricamente Q_e), entrada horizontal.

* El ascenso freático (A_f), agua que ingresa al sistema desde el agua del subsuelo por el borde inferior del sistema, entrada vertical.

Los volúmenes salientes (eliminan agua) del sistema son:

* Salida de aguas al medio externo que pueden ser superficiales o subsuperficiales (genéricamente Q_s), salida horizontal.

* La evaporación (E_t) del agua del suelo y de la vegetación, salida vertical.

* La percolación profunda (P) agua que sale del sistema hacia el subsuelo por el borde inferior del sistema, salida principalmente vertical.

Los volúmenes de almacenamiento dentro del sistema que favorecen la mitigación del anegamiento son:

* Volúmenes de almacenamientos en superficie (ΔV_{sup}): cubetas, lagunas, depresiones e intercepción por la vegetación.

* Volúmenes de almacenamiento de agua en el suelo que pertenece al sistema. Se traduce con un incremento o disminución de humedad en el suelo edáfico (ΔV_{sue}).

Reemplazando todos estos términos en (1), y tomando altura de agua como unidad, la ecuación queda expresada en (2):

$$(R + Q_e + A_f) - (Q_s + E_t + P) = \Delta V_{sup} + \Delta V_{sue} \quad (2)$$

Esta ecuación de balance hídrico discretizada permite identificar los términos sobre los cuales se puede intervenir rentablemente para manejar el anegamiento y aquellos en que solo se puede monitorear su progreso.

En términos prácticos y en condiciones de grandes extensiones rurales bajo cultivo, los términos R, Af, y P no son intervenibles. Sin embargo, un cambio en el manejo agronómico afectaría su proporción drásticamente y podría mejorar los egresos y el almacenaje de suelos. Mediante distintos tipos de pasturas de tipo C4 y/o cultivos adaptados se podría mejorar la cobertura vegetal e incrementar la evapotranspiración real, aunque una vez establecidos no son modificados.

En cuencas hidrográficas usualmente el valor de Q_e es igual a cero siendo que, por definición, no hay ingresos de agua horizontal al sistema. En áreas de llanuras (o extrema planicie), no existe la cuenca como unidad física, por lo que el ingreso de agua externa ha de tenerse en cuenta de alguna manera.

Los esquemas de manejos de intervención sistemática e integrales para el control de anegamientos actúan decididamente sobre los términos que son más factibles de ser intervenidos: Q_s , ΔV_{sup} y ΔV_{sue} . La sostenibilidad del sistema definirá la proporción de la intervención de cada uno de estos parámetros. El sistema tiene un balance que puede romperse interviniendo sobre los términos equivocados. Por ejemplo, incrementando la capacidad de almacenamiento del suelo a través de drenajes superficiales no controlados cuyo efecto es incrementar la profundidad de la capa freática, se podría alterar el equilibrio radicular de los cultivos para acceder a agua en periodos de escasez. Un sistema sostenible exige mantener el estado original del sistema en situaciones normales, permitiendo un cambio anómalo en situaciones extremas.

En síntesis, el modelo conceptual de control de aguas en la planicie es el manejo de los excesos hídricos favoreciendo la retención en el suelo (medio poroso) y en la superficie (cubetas y lagunas) en periodos húmedos, reduciendo el riesgo de inundaciones aguas abajo y regulando y demorando el drenaje (evacuación por uso de vías de aguas naturales o canales principales) en periodos normales, a efectos de aumentar la capacidad de almacenamiento para el próximo período húmedo. Este concepto conservativo de control y manejo de aguas se denomina “sistematización agrohidrológica”.

IV. Problemas hídricos manejables por la sistematización agrohidrológica

En cualquier tipo de diseño hidráulico de control de aguas hay un principio fundamental que es válido para todo tipo de ambientes, cuanto mayor sea el volumen de agua a controlar, mayor será el esfuerzo de utilización y el costo de las obras involucradas. Por tanto un principio universal del control de volúmenes es evitar dentro de lo posible que el agua se junte y se acumule. El objetivo es retener el agua donde cae por medio de almacenamientos y cuando estos estén colmatados, tratar de desfasar la llegada del agua al punto de acumulación aguas abajo.

Dentro de este contexto real, la técnica de sistematización agrohidrológica no busca controlar los volúmenes de aguas involucrados en una inundación generalizada de tipo extraordinaria (Figura 1). Las obras agrohidrológicas son una solución realista dentro del contexto económico posible, ocupándose de aquellos anegamientos prolongados y recurrentes de baja carga hidráulica que son habituales en las áreas de llanuras. La Figura 2 ejemplifica el tipo de problemas pasibles de ser tratados con esta técnica.

Este tipo de anegamientos recurrentes de menor intensidad areal pero mayor frecuencia temporal que las inundaciones, tratados con las técnicas de sistematización agrohidrológica, pueden restringirse a espacios más reducidos, permitiendo reclamar áreas usualmente anegadas para su reincorporación a los esquemas agronómicos productivos.



Figura 1. Inundación con una profundidad media de 1,5 metros. La técnica de sistematización modular no está diseñada para paliar estas situaciones de inundación de paleocauce, aunque el control de escurrimientos con esta técnica en sectores aguas arriba obviamente amortiguaría las inundaciones en áreas aguas abajo.



Figura 2. Anegamientos periódicos típicos en áreas planas. La técnica de sistematización modular está destinada a controlar este tipo de problemas a través de obras sencillas que contemplan las tareas normales de laboreo en el campo. (Foto: campo en las cercanías de General Villegas).

V. Descripción de la técnica de sistematización agrohidrológica modular

A. Definiciones usuales en el glosario de sistematización agrohidrológica

El término “módulo” define la unidad funcional mínima de trabajo del sistema (Figura 3), y tiene su “pseudo-equivalente” con la “subcuenca” en la terminología que se utiliza en la hidrología tradicional. Recordando que tratamos con áreas de extrema planicie, un módulo puede recibir escurrimientos externos, pero para su delimitación se buscan estructuras antrópicas (caminos, terraplenes) o divisorias de agua naturales (lomas) que lo impidan al máximo. Por tanto, un módulo no se define exclusivamente por el terreno natural, sino que se materializa a partir de una combinación de elementos pre-existentes en el sistema y estructuras factibles de ser realizadas.

La “agrohidrología modular” es un conjunto de prácticas conservacionistas rurales, de ingeniería agronómica y civil destinadas a controlar los anegamientos periódicos en campos bajos o en llanuras extensas que presentan condicionamientos o restricciones en el drenaje de suelo, la escasa pendiente y en el manejo.

Definimos como “estructuras modulares” al conjunto temático de obras estructurales civiles y de conservación que cumplen funciones hidráulicas similares pre-establecidas por el diseño. Así hablamos de un conjunto de obras de encauzamiento, conducción, retención, expansión y evacuación. Desde el punto de vista ingenieril, el cálculo estructural de todas ellas es similar debido a la escasa energía del agua. Esto favorece las estandarizaciones y cálculos.

“Circuito hidrológico” es la unidad agrohidrológica básica conformada por estructuras modulares diseñadas para evitar

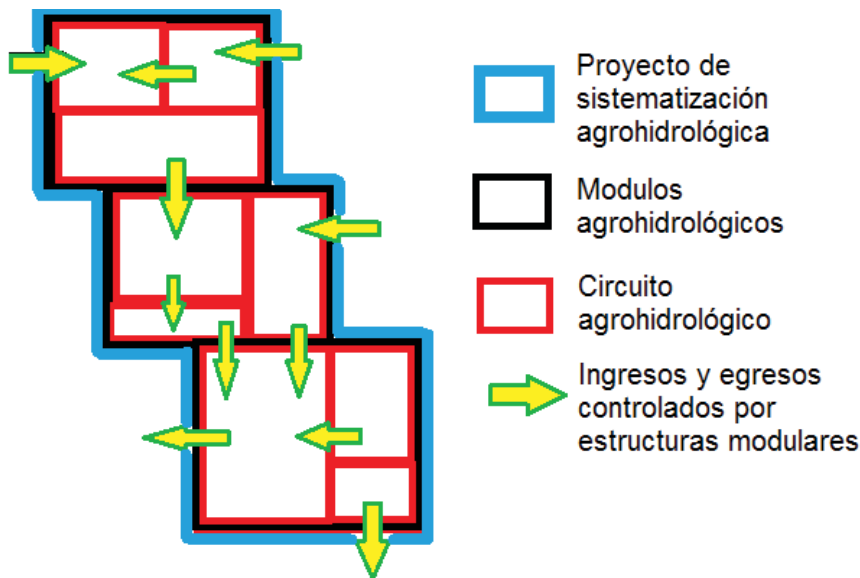


Figura 3. Relación gráfica del glosario utilizado en agrohidrología.

la transferencia anárquica de agua a otras unidades, circuitos o sistemas hídricos. Un módulo agrohidrológico lo conforman un conjunto limitado de circuitos hidrológicos. En caso de no ser posible retener todos los excesos generados dentro de un circuito hidrológico, éstos deben ser transferidos en forma controlada por lugares definidos y acondicionados para tal propósito.

B. Criterios para el ordenamiento hídrico superficial

En primera instancia, se identifica cuál es el origen de las aguas que ocupan las áreas planas. Considerando, por ejemplo, a la Pampa Deprimida en su conjunto se presentan tres situaciones: i) Irrupción de aguas altas del Sistema de Sierras de Tandilia, idea rectora de los proyectos y ejecución de canales de principios del siglo XX. ii) El caso de derrames de cursos de agua es el ejemplo típico de las áreas de disipación y expansión natural del río Salado y para corregir esto, se realizó el Plan Maestro Integral sobre su cauce. iii) Sin embargo, los problemas de anegamiento más importantes desde el punto de vista agropecuario, se considera que son debidos fundamentalmente a las lluvias en la planicie. Al manejo de este exceso apuntan los criterios para el ordenamiento hídrico.

Luego, se establecen los criterios básicos para el ordenamiento hídrico modular (consorciado o predial), a través del manejo de aguas externas e internas. Los excedentes externos al módulo y que ingresan en el sistema, requieren de obras estructurales de defensa y evacuación. En cambio, para el manejo del agua interna generada dentro de los circuitos hidrológicos el criterio se basa en: aumentar la capacidad de captación superficial y edáfica, retener y retardar el escurrimiento en las partes más alta de la unidad

y dirigir ordenadamente los excesos prediales que no puedan ser captados o retenidos a las áreas de conducción y evacuación.

No menos importante es el orden jerárquico que ocupa el ordenamiento hídrico superficial por sobre las prácticas agronómicas en la planificación territorial en áreas de planicies sujetas a procesos de inundaciones y sequías recurrentes, máxime en un contexto nacional de variabilidad climática y uso del suelo.

C. Tipos de obras estructurales para el control y manejo de los escurrimientos

Todas las estructuras que se describen en este apartado tienen como base de cálculo los criterios utilizados en la construcción de terraplenes rurales. Son de poco porte pero su dimensionamiento debe prevenir deslizamientos laterales, erosión y socavamiento. De acuerdo a los criterios básicos para el ordenamiento del agua superficial, se describen los tipos de obras ingenieriles que componen un sistema de sistematización modular ordenadas según su funcionalidad temática.

Estructuras de Captación: tienen por función coleccionar y encauzar el agua de escurrimiento anárquica provenientes de sectores ubicados en posiciones relativamente más elevadas, sean internos o externos al área de trabajo (Figura 4).

Estructuras de Conducción: tienen por función conducir excesos hídricos punto a punto a través de un sistema bordos confinados impidiendo trasvases y afecciones a áreas protegidas (Figura 5).

Estructuras de Retención: tiene por función almacenar temporariamente los excesos en áreas usualmente ocupadas por lagunas semi-permanente produciendo un retardo en los caudales afluentes (Figura 6).

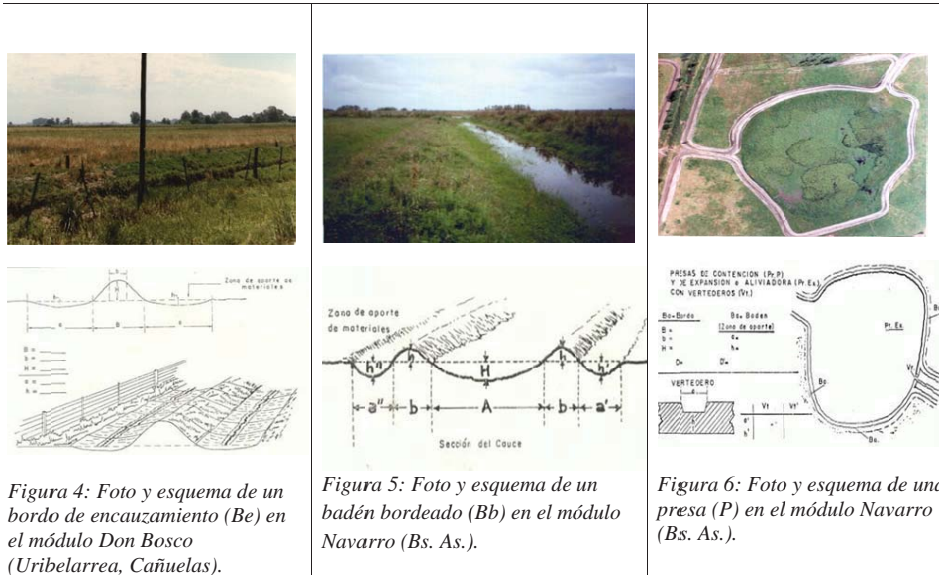


Figura 4: Foto y esquema de un bordo de encauzamiento (Be) en el módulo Don Bosco (Uribelarrea, Cañuelas).

Figura 5: Foto y esquema de un badén bordeado (Bb) en el módulo Navarro (Bs. As.).

Figura 6: Foto y esquema de una presa (P) en el módulo Navarro (Bs. As.).

D. Diseño funcional de obras de sistematización agrohidrológica

El objetivo del diseño funcional es crear un modelo conceptual que comprende y establece el funcionamiento del flujo superficial del agua. La intención es esquematizar ese movimiento con el objeto esencial de compatibilizar las estructuras de control con el esquema de circulación y manejo usual del establecimiento, el cual se debe respetar. Para ello, se requiere: i) Identificar unidades de comportamiento hidrológico interno semi-estanco e independiente “circuitos hidrológicos” (CH). ii) Encauzar y almacenar las aguas internas generadas dentro del sistema. iii) Encauzar, conducir y en lo posible reducir el impacto de las aguas generadas en posiciones externas o superiores del relieve, agregándolas al volumen del almacenamiento superficial permanente o en embalses rurales (1).

Para definir un “CH” se requiere la existencia de una estructura física que define en el terreno la partición de las aguas

entre externas e internas. Estructuras de escasa altura y sencilla construcción como “bordos” o similares son las adecuadas para esta función.

Para la identificación de la dirección local de los escurrimientos se definen las “unidades de ambiente” que enmarcan las áreas de aportes (lomas) a cada plano deprimido (bajos y lagunas) existentes. Para ello, se utilizan herramientas de fotointerpretación, imágenes de satélite, cartas topográficas y verificaciones de campo (3). En la actualidad la tecnología reciente de drones con distintos sensores ópticos o tipo lidar, podría resolver el modelo de terreno con una precisión adecuada. La utilización de estos sistemas debe ser evaluada en función del costo de utilización y beneficios adicionales. Para el cálculo de volúmenes y caudales de agua que el diseño funcional “puede controlar” se usan diversos modelos de cálculo de parámetros hidráulicos del suelo e hidrológicos adaptados a condiciones locales (8, 4). Para esta adaptación

la investigación científica resulta esencial y requiere una actualización permanente. La utilización de modelos hidráulicos bidimensionales junto con modelos digitales de elevación de terreno de alta resolución es probablemente la mejor opción en términos de cálculo hídrico puro.

E. Diseño y cálculo estructural de obras de sistematización agrohidrológica

El diseño estructural define las dimensiones constructivas de cada estructura modular definida previamente en el diseño funcional. Siendo que el sistema trabaja con baja energía y en un área plana, es muy importante utilizar herramientas de cálculo hidráulico que, aunque sencillas, obtengan alturas de aguas correctas para cada escenario de cálculo (Figura 7 y Figura 8). Una ventaja de las estructuras que se utilizan es el bajo costo de su redimensionamiento o remodelación, lo que permite ciertas licencias a la hora del cálculo ingenieril.

Según sea la metodología constructiva disponible se preverá siempre un sobredimensionamiento estructural para prevenir

los asentamientos de las obras junto con las tareas de compactación de tierras estándares en ingeniería de terraplenes adecuadas para minimizarlos. El trabajo de diseño se completa con estructuras de regulación: alcantarillas, tubos compuertas en material constructivo de hormigón, metal corrugado plásticos resistentes no perecederos.

F. Maquinaria para la construcción de estructuras de tierra

Una de las características comunes de los trabajos de sistematización agrohidrológica es que su ejecución se realiza con instrumentos de labranza adaptados en mayor o menor grado. La mayoría de las estructuras lineales (Figura 4 y Figura 5) de menor porte se pueden realizar adecuadamente con arado de disco, hoja niveladora, pala de arrastre, lo que permite minimizar el uso de maquinaria vial pesada (topadora, retroexcavadora) para aquellos casos específicos que lo requieran como son las presas (Figura 6).

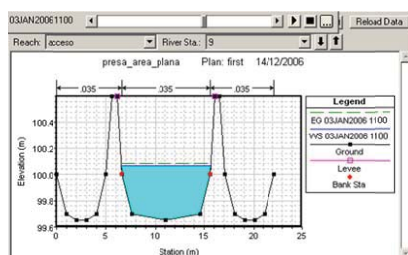


Figura 7: Características geométricas de la sección del Badén bordeado (Bb). Ejemplo salida del modelo HEC-RAS. El esquema corresponde a la Figura 5.

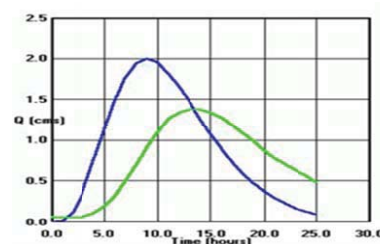


Figura 8: Simple efecto regulador de una Presa (P) sin salida regulada. La línea de color azul es el caudal de entrada y la verde el de salida en función del tiempo. Ejemplo salida modelo HEC-HMS. El esquema corresponde a la Figura 6.

VI. Casos de estudios: sistematización y evaluación de las obras agrohidrológicas

A. Zona de canales al sur del río Salado de Buenos Aires “Cuenca del arroyo del Azul”

La sistematización agrohidrológica a través de la secuencia “Módulo-Distrito-Consortio” para el control de los excesos y déficits hídricos en áreas de baja energía morfogenética “Pampa Deprimida”, ha sido desde la década del ‘70 un tema abordado por INTA. Prueba de ello son los seis Módulos Experimentales implementados en convenio de cooperación técnica entre el INTA y el Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires, en el marco de la Ley Provincial N° 10.170/84 y su decreto reglamentario 4443/86 sobre

beneficios impositivos a los consorcios de productores de la Zona Deprimida del Salado que adopten la técnica agrohidrológica y prácticas agronómicas en sus predios.

En el Módulo N° 16 “Azul”, con una superficie de 35.500 ha, se identificaron 4 Distritos Agrohidrológicos (Figura 9 a) y con diferentes grados de riesgo hídrico el Distrito n° 1 (Figura 9 b).

En el Distrito N°1 “Consortio Cañadón de Gutiérrez” (8500 ha) se aplicó la metodología consorciada de circuitos hidrológicos integrados (Figura 10), siguiendo la metodología descrita por Parodi y Damiano (7). La finalidad del proyecto fue encauzar, conducir y retener y/o retardar los escurrimientos provocados por las precipitaciones en el sector de pedemonte del Sistema de Tandilia y regular su salida ha-

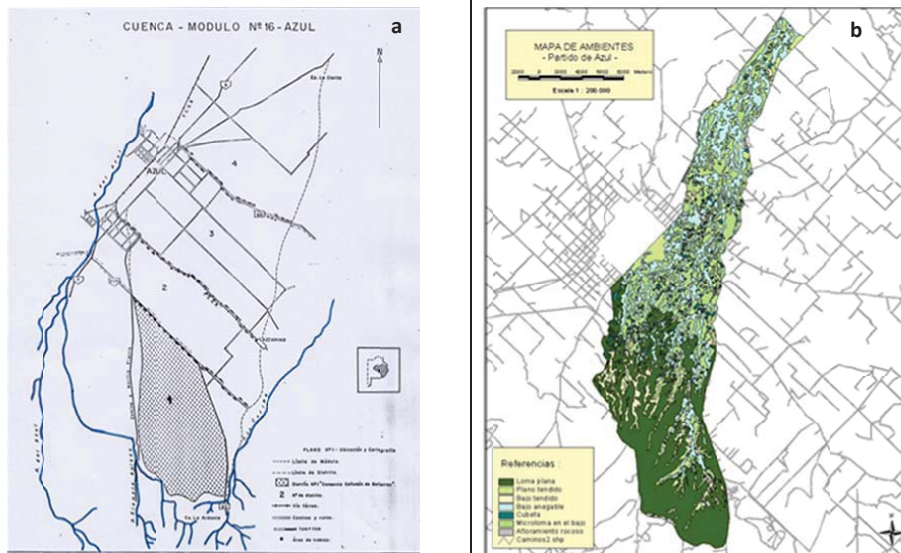


Figura 9. Módulo Agrohidrológico Azul (a) y mapa de riesgo hídrico correspondiente al Distrito n° 1 sombreado (b).

cia la zona de Derrame, utilizando para ello distintas obras estructurales de ingeniería rural de acuerdo a cada situación de relieve. Las obras fueron construidas durante el período 1989-1992 y financiadas por el impuesto inmobiliario de los Consorcionistas (n = 16) para un período máximo de 5 años. Actualmente la ley 10.170 se encuentra en vigencia y ha sido reafirmada en el artículo 180° del reciente Código de Aguas de la Provincia de Buenos Aires (Ley N° 12.257). Sólo se modificó el artículo 10° del Capítulo II que otorgaba beneficio por desgravación del Impuesto Inmobiliario Rural a los productores agrupados voluntariamente en consorcios. En otra parte, la ley también prevé la presentación de proyectos agrohidrológicos por particulares (Artículo 18°, Capítulo II).

B. Cuenca del río Arrecifes, Provincia de Buenos Aires

El trabajo se llevó a cabo en un establecimiento con una superficie de 780 ha, ubicado geográficamente entre los 34° 06'36" Sur y 60° 03'57" Oeste en el partido de Arrecifes, provincia de Buenos Aires (Figura 11) (6).

El proyecto se compuso de dos partes: 1) un sistema de terrazas para el control y ordenamiento de los escurrimientos superficiales en pendiente (Figura 12), y 2) la sistematización agrohidrológica para el ordenamiento de excesos hídricos en planos bajos (Figura 13).

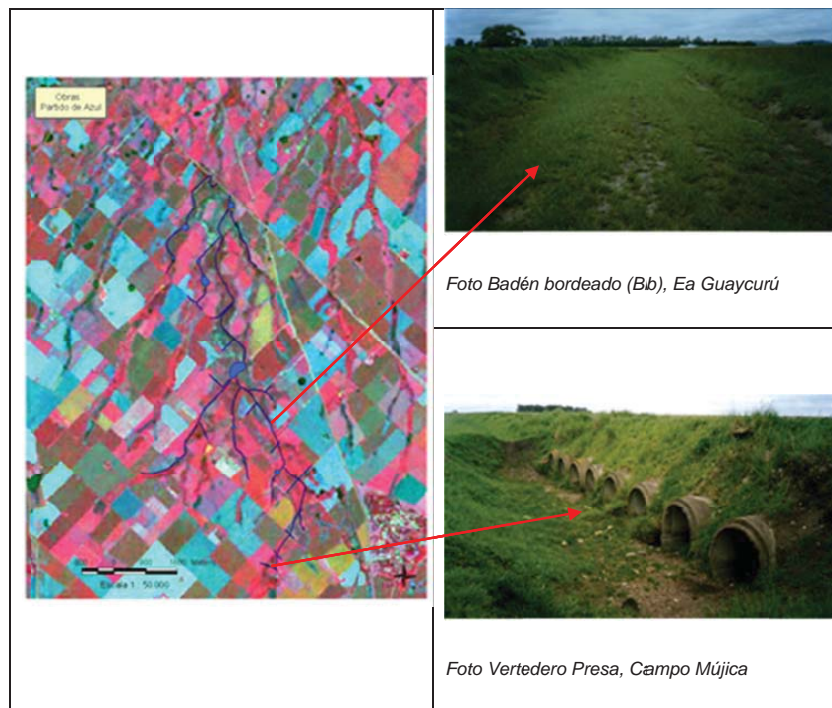


Figura 10. Diseño de obras agrohidrológicas “Cañadón de Gutiérrez” (líneas azules) sobre imagen de satélite Landsat.

Las obras fueron evaluadas a través de secuencias de imágenes Landsat resolución 30 m, usando la combinación de bandas del infrarrojo cercano (banda 4), visible (banda 3) e infrarrojo medio (banda 5) en falso color. En la Figura 14 se presenta el lote con terrazas totalmente cubierto con cultivo de trigo con tonalidades rojizas indicativo de una alta actividad fotosintética y muy buen

estado de desarrollo. La Figura 15 muestra la recuperación de casi 6 ha de suelo con aptitud agrícola (color celeste); y una franca recuperación de la pastura natural en el sector más deprimido, expresado por colores vivos en la imagen 2004 en relación al color verdoso oscuro en la imagen 2003 (Figura 13).

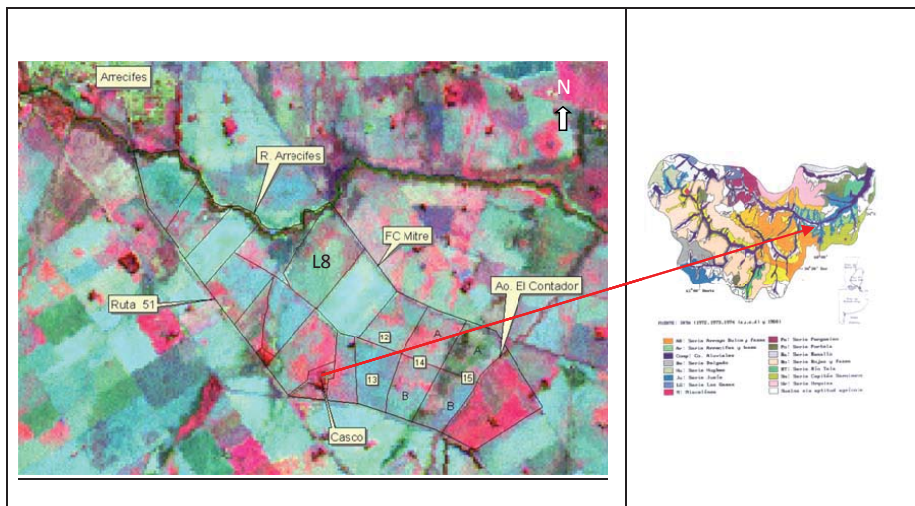


Figura 11. Establecimiento sobre imagen de satélite Landsat de mayo 2003 y su ubicación geográfica en la cuenca del río Arrecifes.

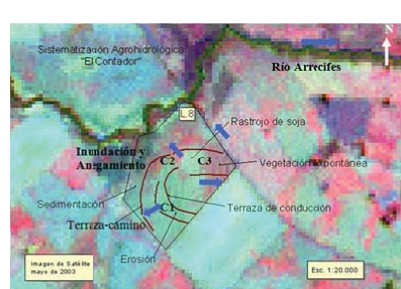


Figura 12. Sistema de terrazas de base ancha cultivable para el control de erosión hídrica en una superficie de 73 ha, figura 11 (L 8). C: Curvas de nivel.

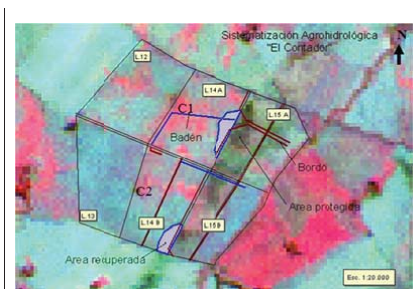


Figura 13. Diseño agrohidrológico de protección y conducción y represado de agua cubriendo una superficie de 213 ha, figura 11. C: Circuitos hidrológicos

C. Región sin drenaje superficial del sur de Córdoba

En un campo con una superficie de 2286 ha de Gral. Viamonte, Departamento Unión, Córdoba, se realizó la sistematización agrohidrológica y la evaluación productiva en tiempo real de áreas hidromórficas recuperadas. La figura 16 presenta el plano de potreros y las curvas de nivel de la Carta Topográfica del IGN 3363-33-2 “Gral. Viamonte” sobre una imagen del satélite Landsat. El paisaje se compone de

lomas arenosas suavemente onduladas con depresiones anegables. La posición relativa del campo se encuentra entre las cotas 130 a 125 m snm, con una equidistancia entre líneas de igual cota de 1,25 m. El sentido de escurrimiento superficial es de dirección SO-NE. El análisis multiespectral y temporal de imágenes del satélite Landsat y la interpretación sinóptica en falso color compuesto (bandas 4-3-5), permitieron confeccionar el mapa de riesgo hídrico (Figura 17).

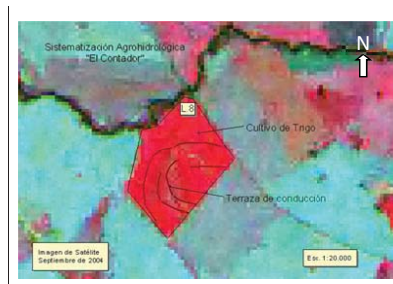


Figura 14. Terrazas diseñadas en sistema de información geográfico (SIG) sobre una imagen de satélite Landsat de septiembre de 2004.

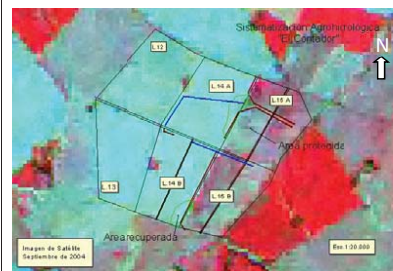


Figura 15. Obras agrohidrológicas en SIG sobre imagen de satélite Landsat de septiembre de 2004.

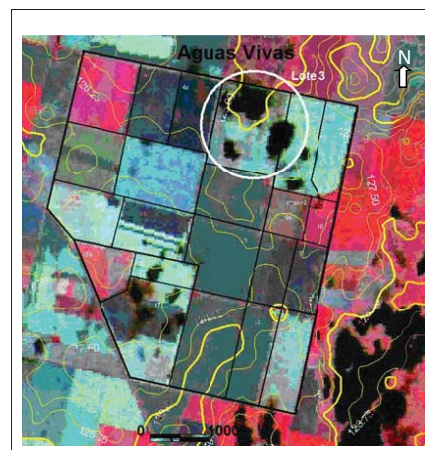


Figura 16. Plano del campo y curvas de nivel sobre imagen Landsat.

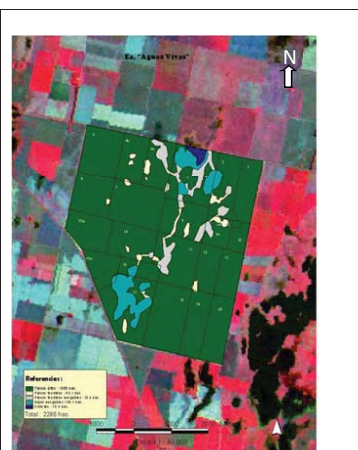


Figura 17. Mapa de riesgo hídrico del Establecimiento.

El proyecto agrohidrológico consistió en drenar superficialmente los bajos en planos altos hacia la cubeta (Figura 18). Para ello, se diseñaron estructuras de presa y badén simple semi-permanente, calculados para aumentar la capacidad de almacenaje y controlar la superficie freática en la zona radical (Figuras 18 y 19 respectivamente).

El funcionamiento de las obras fue evaluado ex ante (2006-2007) y ex-post (2007-2008), utilizando un sistema de cosecha de precisión que consistió básicamente en un monitor GREENSTAR (138126) y un GPS conectados para coleccionar valores de producción en tiempo y espacio real (<http://www.geoagris.com>). Las Figuras 20 y 21 muestran los resultados de la producción medida en tiempo real antes y después respectivamente, utilizando el procedimiento de SIG mencionado en quintales por hectárea.

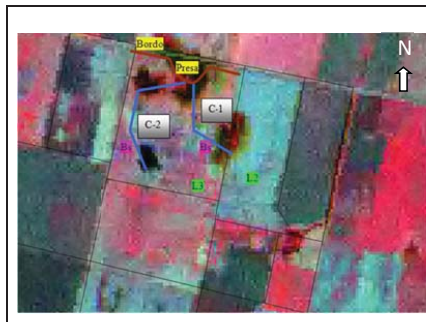


Figura 18. Diseño Agrohidrológico sobre imagen Landsat de mayo 2003. C: Circuitos; Bs: Badén simple; Presa (P).



Figura 19. Badén simple construido en el 2006, drenando excedentes hídricos hacia la Presa, septiembre 2007.

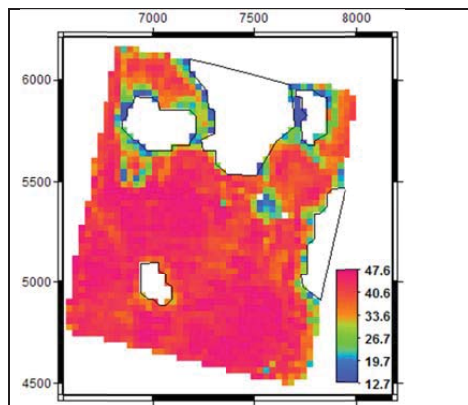


Figura 20. Producción de soja 2006-2007 en qq/ha.

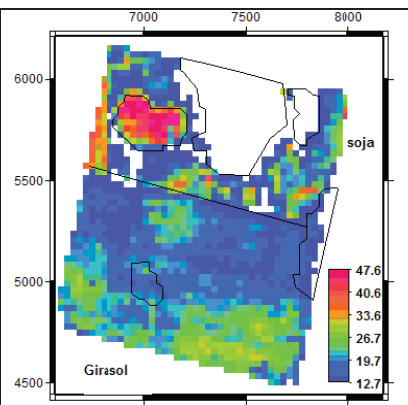


Figura 21. Producción de soja y girasol 2007-2008 en qq/ha.

La Figura 20 muestra que los sectores de bajos anegables (Figuras 16 y 17) no fueron cultivados o se perdió la siembra por exceso de agua en superficie, y aquellos con abundancia de agua y sin drenaje redujeron su producción probablemente por efecto de anoxia temporal (llovió de noviembre a abril 773 mm). El resto del área produjo a nivel potencial siendo que la demanda de agua de la soja fue satisfecha totalmente. En la siguiente campaña agrícola (Figura 21) llovieron 460 mm. La producción general tanto de la soja y el girasol fue relativamente menor asociada en general a la deficiencia de agua. Sin embargo los bajos tendidos drenados recuperaron su producción, alcanzado la soja rendimientos similares a los sectores sin riesgo hídrico (Figura 20). En síntesis, como era de esperarse el control del drenaje permitió recuperar esas tierras a la cadena productiva.

VII. Conclusiones y recomendaciones de manejo de cuencas

El manejo agrohidrológico de tipo “ingenieril-rural” contempla la dualidad típica de la región pampeana en términos climáticos: inundaciones y sequías, incidiendo directamente en la mitigación de ambos procesos que llevan a la salinización superficial de los suelos. Asimismo, establece un marco hídrico y edafológico apropiado para acumular los excedentes de agua en sectores menos productivos (cubetas/presas), protegiendo a otros ambientes de uso pecuario con riesgo evidente de hidromorfismo y halomorfismo. Además, se la considera un paso previo necesario para la realización de prácticas culturales y vegetativas, como son el mejoramiento y la remediación de suelos, y la adaptación de especies nativas e implantadas.

Para las asociaciones o consorcios de productores, cuyos establecimientos abarcan una importante proporción de la cuenca, es la mejor manera de trabajar en el tema de control de anegamientos. Sin embargo no existen incentivos (deducción de tasas o impuestos para la ejecución de los trabajos) por lo que se requiere un esfuerzo a nivel político (Municipal, Partido o Provincia) para convocar voluntades en forma tal de hacer el sistema atractivo comercialmente.

Desde el punto de vista hídrico, para manejar el agua de lluvia durante un evento de precipitación, es menester controlar y tener capacidad de almacenamiento de agua en el suelo cuanto antes del evento. El mejor control lo logra el almacenamiento disponible.

Si hay excesos de agua manejables se los debe controlar donde el agua cae. Se deben impedir los trasvases siempre que se pueda. Se debe impedir la salida del agua libremente y de esta manera favorecer que el agua no se acumule aguas abajo. Almacenamiento y retraso son las claves, aun en ambientes urbanos.

La inundación es un problema comunitario y tratado individualmente, no tiene solución técnica aceptable. Sin embargo, en algunos casos, anegamientos periódicos como los que trata la técnica de sistematización agrohidrológica tienen una mejor perspectiva de solución aún en situaciones semi-aisladas.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- **BARBAGALLO, J. F.** 1983. Las áreas anegables de la “Pampa Deprimida” un planteo agrohidrológico para su solución. En: hidrología de las grandes llanuras (Ed. M.C. Fuschini Mejía). Actas del coloquio de Olavarría. Vol. II. Olavarría, Argentina. Pp. 787-864.
- 2.- **CONSEJO HÍDRICO FEDERAL.** 2003. Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina. Fundamentos del Acuerdo Federal del Agua. 13 pp.
- 3.- **DAMIANO, F; P. A. MERCURI Y S.M. CARBALLO.** 1997. Sensores remotos en el análisis y propuesta agrohidrológica. Distrito Gral. Alvear. Pcia. de Bs. As. Revista de Investigaciones Agropecuarias. Pp. 1-15.
- 4.- **DAMIANO, F. Y G.N. PARODI.** 2010 a. Aplicación de herramientas simplificadas de modelización para diseño de obras agrohidrológicas en planicies de inundación. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Rosario, Resumen en Actas, trabajo 4_370_2. Pp. 220. Trabajo completo en CD. Argentina. 31 de Mayo al 4 de Junio.
- 5.- **DAMIANO, F. Y G.N. PARODI.** 2010 b. Evaluación productiva en tiempo real de áreas hidromórficas recuperadas por el manejo agrohidrológico. Iº Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras Azul, Buenos Aires, Argentina. 21 al 24 septiembre. En: Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura. Eds. M. Varni, I. Entraigas, L. Vives. Tomo II: Modelación en hidrología. Pp. 597-603. ISBN: 978-987-543-392-2.
- 6.- **DAMIANO, F. Y M.A. TABOADA.** 2005. Sistematización agrohidrológica pedrial en la cuenca del río Arrecifes, Provincia de Buenos Aires. En: Avances en Ingeniería Agrícola 2003-2005. Editor O. Barbosa. CADIR 2005. San Luis. Argentina. Pp. 235-239.
- 7.- **PARODI, G.N. Y F. DAMIANO.** 1989. “Una propuesta de sistematización agrohidrológica para el control de escurrimientos superficiales en microcuencas de pedemonte”. Seminario Internacional de Hidrología de Grandes Llanuras. H.G.LI. II/65/TRA. CONAPHI. Bs. As. 26 pp.
- 8.- **PARODI, G.N. Y F. DAMIANO.** 2007. Estimación de parámetros hídricos básicos para planicies de inundación con información escasa. XII Congreso Español de Teledetección. Mar del Plata, Argentina. 19 al 21 de septiembre.