

HIDROGEOLOGÍA DE GRANDES LLANURAS. PARTICULARIDADES EN LA LLANURA PAMPEANA (ARGENTINA)

Eduardo Kruse¹ y Erik Daniel Zimmermann²

(1) Investigador Independiente CONICET, UNLP

*(2) Investigador Asistente CONICET. Centro Universitario Rosario de
Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM). FCEIA. UNR*

Resumen. En este trabajo se presenta una caracterización hidrogeológica regional y el estado del conocimiento actual acerca de la cuantificación y modelado de los procesos hidrológicos en la llanura Pampeana (Argentina). Se efectúa una síntesis de los principales rasgos geomorfológicos, geológicos de subsuelo e hidrogeológicos. Además se analizan las particularidades y procesos hidrológicos dominantes y sus posibilidades de simulación mediante modelos matemáticos. Se concluye en que los avances logrados en la cuantificación de los procesos intervinientes se ha basado en la adaptación de herramientas tecnológicas aptas para otros ambientes. Se reconoce una gran falencia en el campo de las mediciones de variables hidrológicas y en el desarrollo de modelos apropiados para simular los procesos dominantes. Es necesario contar con una caracterización de mayor detalle acerca de los niveles acuíferos, con especial referencia a la evaluación de las reservas de agua dulce y sus variaciones areales y temporales. Los estudios deberán proveer suficiente información a los responsables de tomar decisiones sobre los impactos esperados a largo plazo de las distintas opciones de las actividades de utilización y manejo del suelo y agua.

Abstract. The regional hydrogeological characteristics and the state of the current knowledge about the quantification and modelling of hydrological processes in the Pampean plain (Argentina) are presented. This paper shows a summary of the main geomorphological, geological and hydrogeological features. Furthermore the particularities and predominant processes and their possibilities of simulation through mathematical models are analysed. The advances in the quantification of these processes were based on the adjustment of capable technological tools used in other environments. The scarcity or lack of field measurements of the hydrological variables and of development of appropriate models to simulate the hydrological processes are recognized. General proposals for improving the current situation include detailed studies of the aquifer layers, the evaluation of the freshwater reserves and their areal and temporal variations. The hydrogeological researchs should provide the necessary data for the uses and management of the groundwater.

Palabras claves: hidrogeología, grandes llanuras, llanura Pampeana

INTRODUCCIÓN

El mayor desarrollo de la hidrogeología tradicionalmente se ha vinculado con llanuras de extensión restringida, limitada por áreas relativamente abruptas en las proximidades. Es menor el conocimiento actual del comportamiento de las aguas subterráneas en grandes llanuras de muy bajas pendientes topográficas, en que con frecuencia es dificultosa la definición de cuencas hidrográficas superficiales. Estos ambientes se caracterizan desde un punto de vista hidrológico por presentar un predominio de los movimientos verticales del agua (evapotranspiración – infiltración) sobre los horizontales (escurrimientos) y muestran una fuerte interrelación entre el agua superficial y el agua subterránea.

Dichos procesos hidrológicos tienen influencia en la disponibilidad y calidad del agua subterránea,

aunque también dependen de las características del medio donde se mueve el agua que están definidas básicamente por las características geológicas.

En las grandes llanuras la posibilidad de reconocer las particularidades hidrogeológicas de subsuelo se vincula esencialmente a datos de perforaciones o a registros obtenidos a partir de técnicas indirectas (geofísica), ya que no existen afloramientos de las unidades que se disponen en profundidad.

En la llanura Pampeana (Argentina), a los problemas mencionados, debe sumarse la escasez o falta de información hidrogeológica de subsuelo, en especial de los niveles de mayor profundidad, ya que los datos existentes se refieren a las unidades más someras que son las de mayor explotación actualmente. Además resultan escasos los datos hidrométricos (superficial y subterránea) históricos

que permitan avanzar en una cuantificación más precisa de los fenómenos.

Las aguas subterráneas en la llanura Pampeana son utilizadas para distintos fines (agua potable, riego, industrias, ganadería) y ello ha tenido influencia en el desarrollo socioeconómico de distintas regiones, pero también tienen un papel fundamental en las variaciones ambientales (sequías e inundaciones) dada su vinculación directa con el agua superficial. De esta forma adquiere importancia comprender adecuadamente el comportamiento hidrológico en distintas escalas espaciales y temporales, contemplando en primera instancia un análisis global en un marco regional, mediante un tratamiento integrado del ciclo (aguas superficiales – subterráneas - variables hidrometeorológicas).

El objetivo de este trabajo es presentar una caracterización regional de los procesos hidrogeológicos, y los avances referidos a la cuantificación y modelado de dichos procesos en la llanura Pampeana. Para el primer caso es fundamental la valoración de las condiciones geológicas y geomorfológicas para una adecuada caracterización e incluso estimación temporal y espacial de los procesos de recarga, almacenamientos y escurrimientos superficiales y subterráneos. Con relación al segundo aspecto, es decir la cuantificación y modelado, se analiza la importancia de simular los procesos y su ajuste a partir de datos observados.

EVOLUCION DEL CONOCIMIENTO

El conocimiento de las aguas subterráneas en la llanura Pampeana ha evolucionado en función de las necesidades del recurso hídrico, de su incidencia en distintos problemas ambientales y de los avances tecnológicos.

Las poblaciones indígenas primitivas conocían las posibilidades que brindaban manantiales, lagunas, ríos e incluso algunos tenían localizado la presencia de aguas freáticas dulces a escasa profundidad. Los colonizadores cuando exploraron el territorio reconocieron los recursos hídricos superficiales asentando las poblaciones en sus vecindades, pero ante la amplitud del territorio y la existencia de importantes sequías debieron recurrir a la construcción de pozos que alcanzaban el agua subterránea más somera.

En la segunda mitad del siglo XIX se comienzan analizar con mayor intensidad los problemas vinculados al agua y su relación con el conocimiento geológico. En esa época se producen una expansión en el ámbito internacional de las posibilidades que brinda la explotación de las aguas subterráneas. Debido a esa influencia y a la necesidad de extender la ocupación del territorio en la llanura Pampeana se produce un impulso en la prospección hidrogeológica (Windhausen, 1931). Así en 1862 se ejecuta en Buenos Aires la primera perforación (Sbarra, 1973) y comienzan a planificarse poblaciones donde la única fuente de abastecimiento de agua potable es el agua subterránea.

A comienzos del siglo XX se crea la Dirección General de Minas e Hidrología dependiente del Ministerio de Agricultura de la Nación. Entre sus objetivos se encuentra la realización de mapas geológicos e hidrogeológicos, confeccionándose un plan de perforaciones profundas de exploración. En ese marco son numerosos los autores que se dedicaron al recurso hídrico subterráneo. Uno de los más destacados en la materia ha sido Stappenbeck (1926), con un trabajo publicado en Alemania, que representa un estudio trascendente sobre el agua subterránea en la llanura Pampeana.

A partir de 1960 comienzan estudios de reconocimientos sistemático y programas de diagnóstico y evaluación de aguas subterráneas. Estos estudios estuvieron a cargo de la Dirección Nacional de Geología y Minería, direcciones provinciales de hidráulica, universidades nacionales, Consejo Federal de Inversiones, etc., en algunos casos con el apoyo y asistencia de organismos internacionales.

En 1983 se realiza en Argentina el Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras (Fuschini Mejía, 1983), en el cual se sintetizan los avances logrados en la temática, destacándose la interrelación existente entre los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos y la necesidad de intensificar los estudios de acuíferos profundos recargados en las llanuras. Además se plantea como indispensable avanzar en la cuantificación de los procesos y en la adaptación y desarrollo de modelos de simulación aptos para este tipo de ambientes, que posibiliten la predicción del comportamiento del sistema para situaciones normales o extremas, tanto en su condición natural como afectado por las actividades antrópicas.

Los avances más recientes incluyen una fuerte componente en el desarrollo en tal sentido. Se incluye al agua subterránea como un elemento importante en cuestiones ambientales, cuantificándose procesos de infiltración, evapotranspiración, transporte del agua en la zona no saturada (ZNS) y en la zona saturada (ZS). A pesar de ello existe un déficit significativo en cuanto a una escasez o falta de datos básicos y de un conocimiento adecuado del medio físico que posibiliten un entendimiento global del comportamiento de las aguas subterráneas en llanura Pampeana.

PARTICULARIDADES GEOMORFOLÓGICAS, GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS

La llanura Pampeana (Figura 1) ocupa una superficie del orden de 500.000 km², con altitudes que se encuentran por debajo de los 200 m sobre el nivel del mar. Esta llanura está cubierta por un depósito sedimentario, predominantemente limoso (loésica) de edad cuaternaria, que cubren varias cuencas sedimentarias de distintas edades y orígenes geológicos. Como fuera mencionado la falta de afloramientos limita el análisis geológico a la síntesis de las observaciones basadas en información de subsuelo.

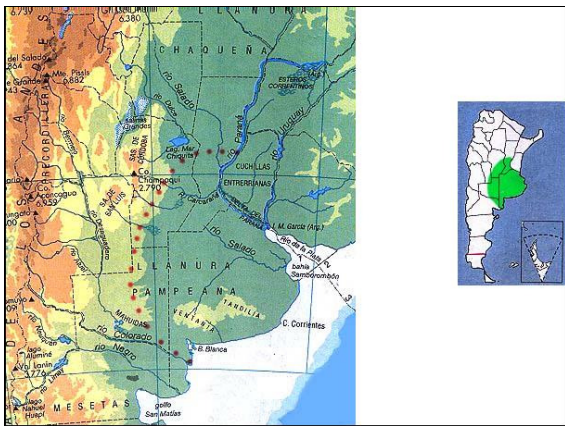


Figura 1: Ubicación de la llanura Pampeana (Argentina)

El paisaje se caracteriza por bajas pendientes topográficas, una baja densidad de drenaje y por la presencia de materiales relativamente permeables en la superficie del terreno (Sala et al, 1983). Una llanura representa a un relieve plano de muy baja pendiente, que pueden ser inferiores a 1%. En la llanura Pampeana varían desde esos valores a aquellos que están muy por debajo, siendo del orden de 1 por mil

e incluso menores a 0,5 por mil. Dentro de este marco variaciones que adquieren importancia desde un punto de vista hidrogeológico y que se vinculan con la ubicación y características de llanura. Entre estos factores se debe señalar la relación que existe entre la superficie de la llanura y áreas montañosas periféricas, las pendientes regionales y rasgos microtopográficos, las características morfológicas generales y locales.

Rasgos geomorfológicos

El relieve de la región responde a distintos eventos ocurridos en tiempos pasados. En la geomorfología de la llanura Pampeana se deben destacar dos aspectos, uno se vincula con la distribución espacial de los componentes hidrolitológicos aflorantes y el otro se vincula con las características de la energía que modeló el paisaje. El primer aspecto, ante la falta de otra información, puede indicar distintas posibilidades, mayor capacidad de infiltración, de almacenamiento, de recarga, etc. La importancia del segundo aspecto citado referido a energía, radica en que la geomorfología puede ayudar al definir el comportamiento hidrológico a partir de las deducciones que pueden realizarse acerca de los procesos de erosión y sedimentación reconocidas en los materiales aflorantes (Kruse, 1992a).

Los reducidos valores de las pendientes topográficas, la escasa expresión morfológica de la llanura y las condiciones climáticas llevan a que el potencial morfogenético sea muy bajo. Asociado a ello el proceso fundamental que tiene lugar es la meteorización y la formación de suelos (Fidalgo, 1983). En muchos casos las cuencas de drenaje no están definidas. En otros las cuencas de drenaje, salvo en las zonas de mayores pendientes son poco definidas y en general pobremente integradas con una textura de drenaje gruesa o muy gruesa. Presentan planicies de inundación muy angostas y limitadas a las zonas vecinas a los cauces.

En las zonas próximas a los frentes serranos (Córdoba, San Luis, en menor medida en las sierras de Buenos Aires) se observan formas de conos aluviales que integran un clásico pie de monte, donde el drenaje muestra el diseño de ese tipo de ambiente. Estos cursos tienden a desaparecer o carecer de afluentes al alejarse del frente montañoso, resolviéndose comúnmente en zonas suavemente cóncavas donde quedan las aguas temporariamente retenidas en depresiones (Sala et al, 1985).

Se debe destacar un predominio en distintos ambientes de llanura Pampeana de sedimentos eólicos en superficie o formas vinculadas a sedimentación eólica, es decir que prevalecen formas y depósitos vinculados a climas áridos o semiáridos, que se diferencian del clima actual de la región.

Condiciones geológicas de subsuelo

La información actual del subsuelo permite reconocer las características de las unidades menos profunda, pero no es suficiente para las más profundas, y la interpretación del comportamiento de las mismas sólo puede hacerse sobre la base de hipótesis generales.

En la llanura Pampeana únicamente existen afloramientos de rocas antiguas en la Sierras de Ventanas y Tandil, que desde un punto de vista de la estructura geológica representan a elementos estructurales positivos (Figura 2). En el resto de la región se reconocen cuencas sedimentarias (elementos estructurales negativos), cuya historia geológica es relativamente semejante dentro de términos generales (Zambrano, 1974).

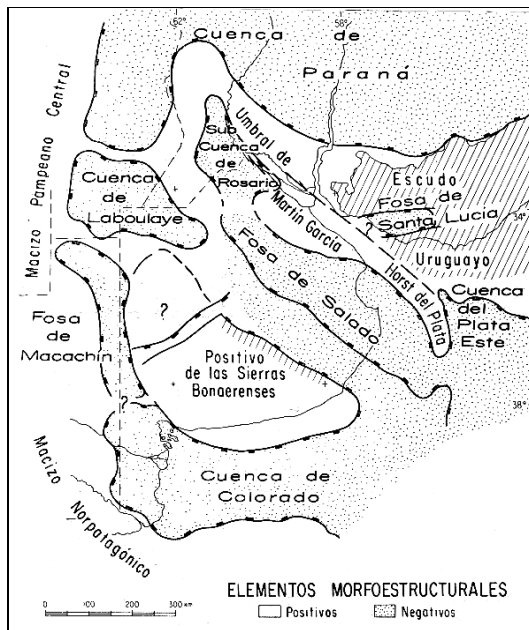


Figura 2: Cuencas sedimentarias, según Irigoyen (1975)

Entre las cuencas sedimentarias deben mencionarse las cuencas del Colorado y del Salado, con un relleno que supera los 6000 m de espesor, la de Laboulaye, con un espesor sedimentario superior

a 1500 m en su parte central, la cuenca de Rosario y la cuenca de Macachín, donde el basamento se encuentra a una profundidad mayor a 2000 m. Estas unidades estructuralmente deprimidas se encuentran marginadas por elementos positivos que representan el límite de la llanura, incluyéndose el Macizo Pampeano, constituido por rocas metamórficas e ígneas de edad precámbrica y paleozoica, Macizo Norpatagónico, compuesto preferentemente por terrenos plegados, en parte metamórfico del precámbrico y eopaleozoico y el Umbral de Martín García, relacionado con el escudo precámbrico brasileño (Yrigoyen, 1975).

Las cuencas sedimentarias se encuentran colmatadas por unidades de origen continental y marino (Figura 3). Una sucesión representativa es posible establecer en la cuenca del Salado. En la inmensa mayoría, las Formaciones que se describirán están ocultas en el subsuelo, por lo que la interpretación se basa en los estudios hechos sobre muestras de perforaciones y en la eventual interpretación de datos geofísicos.

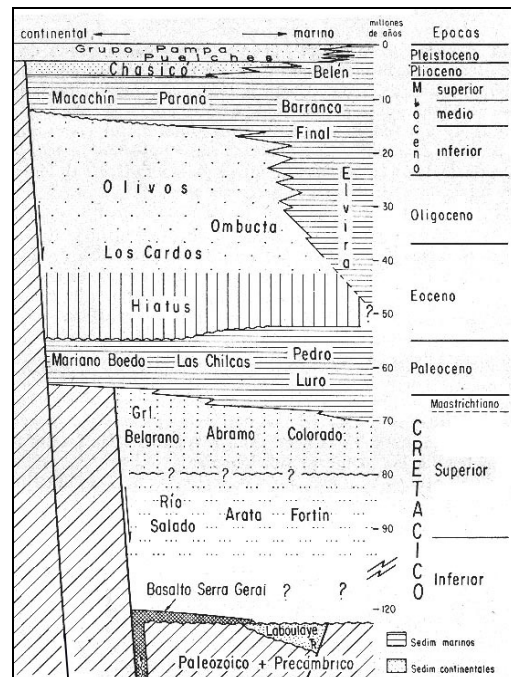


Figura 3. Esquema estratigráfico, según Irigoyen (1975)

Se pueden reconocer unidades de edad preterciaria (Sala, 1981), que abarcan a rocas efusivas básicas del cretácico inferior, en muy pocos puntos equivalentes a los basaltos de la Cuenca de Paraná. Las unidades estratigráficas de cretácico

medio – superior, representan a areniscas grises y rojizas, depositados en ambiente continental bajo condiciones oxidantes, en posibles llanuras aluviales. Siguen hacia arriba en la sucesión sedimentaria del Cretácico superior, compuesta por areniscas de origen continental.

Las unidades terciarias incluyen a depósitos marinos (Paleoceno), siendo su componente principal una limolita de color gris verdosa, que en la Cuenca del Salado, alcanza un espesor que supera los 1.000 m. Luego se reconoce la acumulación de los depósitos supraeocenos – oligocenos – miocenos inferiores, que en conjunto constituyen depósitos de origen continental, compuestos principalmente por arenas rosadas y blanquecinas. Se incluye en esta sucesión la Formación Olivos que es conocida como "Mioceno Rojo" ("El Rojo" de los perforadores), compuesta por arenas gruesas a conglomerádicas rojizas. A partir del Oligoceno superior, comienza un nuevo ciclo de sedimentación de origen marino, constituyendo el denominado "Mioceno Verde" o "El Verde" que tiene como componente litológico a arcillitas verdosas y areniscas blanquecinas a verdosas. Por encima de estos sedimentos marinos yacen depósitos de limos arcillosos y/o arenosos (Araucanos), entre los que se intercalan camadas de arenas. Este conjunto de sedimentos de edad Pliocena y tonos rojizos corresponde a sedimentos continentales que alcanzan hasta 200 m de potencia. Hacia el norte de la Provincia de Buenos Aires cubren los depósitos marinos del mioceno, un muy conspicuo depósito de arenas cuarzosas de origen fluvial aportados por una red de drenaje cuyo colector principal era el antiguo sistema Paraguay-Paraná, que constituye las conocidas "Arenas Puelches". El Pampeano cubre finalmente las Arenas Puelches con depósitos preferentemente loésicos y limosos de espesores variables. En las zonas costeras y por los valles de los colectores mayores, han tenido entrada efímeras transgresiones atlánticas que han dejado depósitos conchiles, estuáricos y costaneros.

Características hidrogeológicas

Los sedimentos marinos de edad Mioceno (Paraniano o Verde) constituyen un nivel guía de utilidad desde un punto de vista hidrogeológico (Sala, 1975). Ello se vincula a su extensión areal y también por ser, desde un punto de vista práctico la separación entre unidades de distinto grado de conocimiento y a su vez de vinculación con el ciclo hidrológico actual. A partir de ello es posible definir una columna hidrogeológica (Hernández et al, 1979)

que incluye (Figura 4) a una sección Hipoparaniana, referida a los sedimentos que le infrayacen y una sección Epiparaniana se involucra todos los sedimentos que le suprayacen, incluidas las arenas Puelches y sedimentos Pampeanos. De esta forma la columna hidrogeológica incluye: basamento, sección hipoparaniana, paraniana y epiparaniana. El Basamento está constituido por rocas acuífugas, que se puede considerar como la base "impermeable" del sistema.

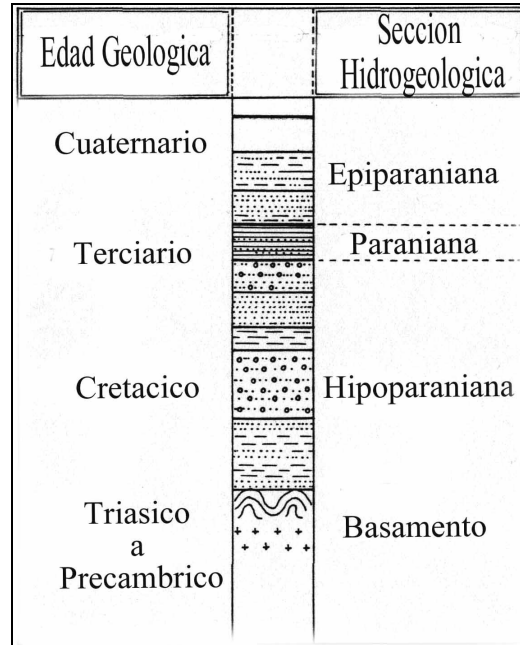


Figura 4. Columna hidrogeológica

La sección hipoparaniana incluye sedimentos alternantes acuíferos de permeabilidad variada y acuicludos. La porción inferior, cretácica, muestra rocas de baja permeabilidad con tendencia a acuífugas. La porción media, asignada al Terciario inferior posee una litología bastante semejante a la anterior y características de baja permeabilidad, con intercalaciones de algunos niveles productivos. La porción superior, Mioceno inferior ("Rojo") es la más importante, especialmente por corresponder a ella los niveles productivos, que resultan trascendentes en la zona de Bahía Blanca, por su carácter surgente, la baja salinidad de sus aguas y los importantes caudales.

La sección paraniana está constituida por sedimentos acuicludos con intercalaciones de acuíferos productivos. En la región Noreste de la Provincia de Buenos Aires, si bien las aguas presentan un alto contenido salino en determinados lugares, son utilizadas para uso industrial, ya que

también ofrecen rendimientos interesantes. La calidad de las aguas utilizadas esta dada por una salinidad que en algunos caso no excede de los 3 g/l.

La columna hidrogeológica culmina con la sección epiparaniana, extendida por todo el ámbito de la llanura, a excepción de los lugares donde aflora el basamento. Tiene gran importancia hidrogeológica, especialmente por ser la única con relación directa con las fases superficial y atmosférica del ciclo hidrológico, respondiendo rápidamente a sus variaciones y actuando como generadora activa con relación a las unidades inferiores. En la región llanura pampeana está conformado por sedimentos predominantemente pelítico, limo loessoide con abundante vidrio volcánico y en menor media por carbonatos de calcio. El resultado hidrogeológico es un ambiente de relativa baja permeabilidad, dentro del cual se insertan lentes de mediana permeabilidad portadoras de niveles productivos. El cuadro enunciado presenta modificaciones en las proximidades de los límites de la llanura donde existe un incremento en la granulometría y en la permeabilidad de los sedimentos.

En la región noreste de Buenos Aires y Este de Santa Fe, en la base de la sección existen las denominadas Arenas Puelches. La importancia hidrogeológica ha llevado a determinar dos subdivisiones en este ambiente: puelche y epipuelche, separadas por capas filtrantes.

La sección epiparaniana es la mejor conocida. En áreas densamente pobladas se hace sentir la incidencia de la explotación de las aguas subterráneas, que se traduce en grandes conos de depresión y contaminación. Esta sección debe considerarse como una única unidad, en el que la capa freática es el elemento activo y el resto de la sección el pasivo.

PARTICULARIDADES Y PROCESOS HIDROLÓGICOS DOMINANTES.

Los términos de la fórmula del balance hidrológico en una gran llanura, como la llanura Pampeana tienen distinta importancia que en un área de fuertes pendientes. La baja pendiente disminuye la velocidad de escurrimiento superficial regional, que se hace poco significativo. Ello implica un mayor tiempo de contacto de agua con la superficie del terreno, incrementándose la posibilidad de infiltración y evapotranspiración. Un aspecto a

resaltar es la importancia de los procesos de transporte vertical y almacenamientos que se dan en superficie, en la ZNS y en la ZS.

En el mencionado balance deben considerarse los almacenamientos por interceptación en áreas cultivadas, contemplando porcentajes de cobertura areal y factores propios de cada cultivo y sus fases de crecimiento. Los almacenamientos en superficie, temporarios o permanentes, también representan una componente muy importante, por ende, los modelos de simulación deben contemplarlos.

El análisis del complejo movimiento del agua en la ZNS, la cual conecta los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos, constituye un objetivo primordial y al que se le deba dar un mayor énfasis en las áreas de llanura.

La conjunción de factores geomorfológicos y climáticos (clima templado húmedo con alternancias de períodos secos y húmedos) dan lugar a sistemas hidrológicos que van desde un extremo con drenaje organizado (lineal) y otro carente de red de drenaje (areal). En el primer caso (Noreste de la Provincia de Buenos Aires, Este de Santa Fe) existe un escurrimiento superficial local hacia los cauces, y a su vez regionalmente hacia un punto determinado de descarga. En otros casos (Noroeste de Buenos Aires) la inexistencia de cursos fluviales (Figura 5) hace que al producirse precipitaciones el agua no presente suficiente energía para escurrir por la superficie hacia un punto determinado de descarga.

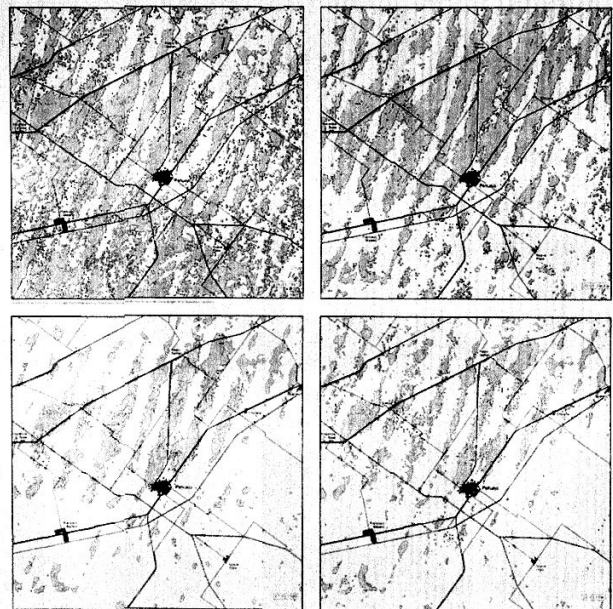


Figura 5. Variación temporal de superficies anegadas en una zona carente de cursos fluviales (Pehuajó en el Noroeste de Buenos Aires)

La escasa pendiente remarca las influencias atenuadoras de las retenciones superficiales, los "cursos" de agua se "dispersan", se "des-encauzan", los aportes se dan lentamente. Frecuentemente no puede precisarse una superficie tributaria, manifestándose transferencias en sus divisorias, con pluralidad de puntos de salida en algunos casos. Además con frecuencia la red de drenaje no es el reflejo del clima, sino que se ve intervenida antrópicamente, labrada mediante canalizaciones u obstruida mediante obras de arte. Estos elementos distorsionan fuertemente la naturalidad de la red. Estas diferentes manifestaciones del comportamiento cuestionan el concepto de *auto-semejanza* (self-similarity), que expresa la semejanza en la respuesta hidrológica entre una porción y la totalidad del sistema.

En el subsuelo es necesario reconocer la existencia de escurrimientos subterráneos locales y regionales (Kruse, 1992b). El local se refiere a un escurrimiento activo, que después de cierto recorrido aflora en los arroyos o lagunas, constituyéndose en su caudal básico. El escurrimiento regional o profundo es un flujo pasivo, sumamente lento, que en una gran llanura es generado por la diferencia entre los volúmenes ingresados y egresados del escurrimiento subterráneo local y que se debe relacionar con los espesores sedimentarias involucrados en el subsuelo de la llanura.

Por otra parte debe tenerse en cuenta que las particularidades mencionadas y la presencia frecuente del nivel freático a escasa profundidad de la superficie, hacen que el agua de los arroyos y lagunas y el agua subterránea se encuentren directamente relacionadas y deban tratarse como una unidad.

La llanura pampeana no es homogénea, sino que en ella se pueden diferenciar particularidades topográficas - morfológicas, hidrogeológicas y variaciones en la distribución de cuerpos lacunares y redes de drenaje.

En la región se registran situaciones húmedas y secas, que derivan de alternancia de períodos con excesos o déficit de agua en los balances hidrológicos.

La realización de balances hidrológicos constituye un paso fundamental para entender el comportamiento en la región. Dichos balances están definidos por la diferencia entre ingresos y egresos

de agua y su consiguiente variación en la capacidad de almacenamiento. Las variables fundamentales intervinientes son: precipitaciones, evapotranspiración; escurrimiento fluvial, escurrimiento subterráneo y la capacidad de almacenamiento. Para esta última se debe considerar el aspecto subterráneo y superficial. La capacidad de almacenamiento subterráneo representa al volumen de agua con posibilidad de almacenarse entre el nivel freático y la superficie del terreno (ZNS). Aparece como relevante por su continuidad areal y por la porosidad del medio superficial. La superficial: corresponde al volumen de agua potencialmente almacenable en los cuerpos lagunares, cañadas, bajos, que almacenan temporariamente y/o retardan la infiltración directa, escurrimiento superficial y/o subterráneo.

Para cada una de los ámbitos de la llanura pampeana se pueden considerar probables comportamientos, teniendo en cuenta si se trata de estados hidrológicos húmedo y seco. En uno húmedo los ingresos superan a los egresos. El grado de diferencia genera una disminución en la capacidad de almacenamiento subterráneo (ascenso de niveles freáticos) y/o superficial (incremento de las áreas anegadas). En un estado hidrológico seco, las salidas superan a los ingresos. El déficit es alimentado por reservas geológicas, aumentando la capacidad de almacenamiento subterráneo (profundización de niveles freáticos) y/o superficial (reducción de cuerpos lacunares).

De esta forma para conocer la situación hidrológica adquieren relevancia el conocimiento de las variaciones en las precipitaciones, la influencia de la evapotranspiración (balances), la evolución de los niveles freáticos y de las áreas cubiertas por el agua en la superficie (Kruse et al, 2001).

CUANTIFICACIÓN DE PROCESOS EN ÁREAS DE LLANURA.

Aceptado el funcionamiento diferente de los procesos hidrológicos de áreas de llanura respecto de los de cuencas con pendientes pronunciadas, es necesario definir qué es lo más importante a medir y cómo y dónde se debe hacer, teniendo previamente definido un modelo conceptual de funcionamiento.

Se considera indispensable la medición de los términos de balance e intercambio de agua y energía verticalmente, dado que los mismos han sido identificados como predominantes en los procesos de llanura.

Para ello se deberán realizar, además de las convencionales, mediciones de almacenamiento en depresiones que deberán estimarse por medio de relevamientos topográficos precisos.

En la ZNS deberán medirse contenidos y potenciales de humedad, desde la superficie hasta la capa freática, incluyendo las propiedades hidráulicas del medio poroso no saturado.

En la zona saturada deberán registrarse las variaciones del nivel freático y de los niveles piezométricos de los acuíferos subyacentes.

La caracterización hidroquímica, en especial de elementos mayoritarios, de los distintos niveles acuíferos adquiere trascendencia ya que la zonación química areal como vertical no sólo aportan datos acerca de las posibilidades de uso del agua, sino que pueden ser sumamente útiles para reconocer particularidades del flujo subterráneo, áreas de recarga y descarga, variaciones litológicas o cuantificar la conductividad hidráulica del medio en el subsuelo (Sala y Kruse 1979, Sala et al 1982). A su vez la presencia en tenores variables de algunos elementos tóxicos (arsénico, fluor, vanadio) en la llanura Pampeana pueden ser el reflejo de variaciones mineralógicas naturales en los sedimentos (Kruse y Ainchil 2000). La contaminación del agua subterránea a partir de vertidos generados por las actividades del hombre es otro elemento que progresivamente adquiere mayor importancia y que localmente permite valorar la significación de los movimientos verticales del agua y su influencia en las reservas de agua subterránea.

Mediante percepción remota (aerofotografías e imágenes satelitales) pueden realizarse estimaciones sistemáticas (en el tiempo) del porcentaje y tipos de cobertura vegetal, almacenamientos en superficie, humedades del suelo, campo de precipitaciones, flujos de calor y evapotranspiración areal entre otras variables. Debe recalarse la necesidad de complementar las mediciones de reflectancia, provistas por sensores remotos, con trabajo de campo para utilizar técnicas de clasificación supervisada.

La gran extensión areal de los sistemas en llanura, realza la importancia del uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la gestión de la información de entrada y el análisis de resultados (Kruse, 1993). Los SIGs conforman herramientas tecnológicas muy adecuadas para analizar la

regionalización de variables hidrológicas así como la clasificación de áreas homogéneas ecológicamente (Usunoff et al 1999)

Paralelamente a las mediciones, deben plantearse los instrumentos metodológicos adecuados para estimar otras variables hidrológicas no mensurables directamente.

La recarga de los acuíferos es un aspecto muy importante a considerar y difícil de evaluar en cualquier ambiente y particularmente en las llanuras. Existen diversas técnicas para cuantificar la recarga, aunque seleccionar la más apropiada resulta una tarea complicada. Pueden emplearse balances hidrológicos generales, balances hidrológicos parciales en superficie o en ZNS, mediante aplicación de trazadores conservativos (balances de cloruros, balances de temperaturas, técnicas isotópicas, etc), analizando la fluctuación de niveles freáticos, mediante modelación numérica, etc. Estimaciones de recarga a partir de las variaciones diarias de los niveles freáticos son empleados por Laurencena et al 1999 y Laurencena et al 2002 en la región Noreste de la Provincia de Buenos Aires. Scanlon y otros (2002) presentan una revisión de éstas técnicas teniendo en cuenta las limitaciones que cada una presenta. Es frecuente que los mecanismos de recarga se aparten de la hipótesis de flujo pistón, adoptando el agua caminos preferenciales en función de la alta variabilidad espacial de las propiedades del medio poroso. Las incertidumbres asociadas a cada método corrobora la necesidad de aplicar técnicas diferentes para aumentar la confianza de las estimaciones.

Los balances hidrológicos en llanura muestran gran sensibilidad a los procesos que involucran movimientos verticales, tales como la evapotranspiración (ET). Para su estimación se han utilizado distintas fórmulas empíricas. La estimación de carácter regional de Thornthwaite sólo es de utilidad para en una primera aproximación evaluar en forma general las posibilidades de recarga del acuífero. Análisis más detallados (Kruse y Rojo, 1985) han demostrado la necesidad de utilizar metodologías de mayor precisión. En otros casos se han desechado propuestas empíricas como las de Thornthwaite y Matter que subestiman la ET (Usunoff et al 1999), aunque frecuentemente las temperaturas medias mensuales constituyen la única información disponible, inhabilitando técnicas de estimación más precisas. Se han propuesto modelos conceptuales que contemplan el balance de energía, junto a factores de resistencia aerodinámica, del suelo y la canopia

(Monteith 1965, Jaworsky 1978). Aplicaciones regionales de estos modelos en la pampa argentina fueron presentadas por Fernández y Hämmerly (2001). A los efectos de realizar simulaciones hidrológicas en el largo plazo, se han propuesto modelos empíricos más sencillos como el de Feddes (1978) junto a estimaciones de la evapotranspiración potencial mediante registros de tanques evaporimétricos afectados por coeficientes correctivos. Las series sintéticas de los registros pueden generarse apropiadamente mediante modelos estocásticos o combinando componentes determinísticas senoidales junto a una señal aleatoria de ruido blanco (Zimmermann 1999).

La precipitación constituye la variable de entrada al sistema, por ende se hace necesario estudiar su comportamiento de manera regional. La distribución espacial de precipitación en las grandes áreas que conforman los sistemas de llanura, es otro aspecto a considerar. La variabilidad se acrecienta a medida que el intervalo temporal de análisis disminuye (Kovacs 1983). La propuesta de métodos de interpolación entre registros de estaciones de medición debe contemplar la estructura de la correlación espacial, considerando la teoría de campos aleatorios de lluvia. Ejemplos de estas técnicas fueron propuestos por Le Cam (1961), Bras y Rodríguez Iturbe (1976), Silber (1985) y localmente por Zimmermann y Silber (2002).

Tanto los anegamiento en superficie como los incrementos de niveles freáticos en sistemas de llanura están asociados a secuencias de eventos pluviales. Frecuentemente y ante la ausencia de información se hace necesario generar las series de lluvia de manera sintética. Para ello se proponen modelos de composición, obteniendo la serie por yuxtaposición de períodos secos y lluviosos. Cada período es representado por variables aleatorias como tiempo entre eventos, duración de la tormenta, intensidad media y máxima, coeficiente de avance, etc. Ejemplos de éstos modelos fueron aplicados en sectores de la región pampeana por Zimmermann et al (1996) y Riccardi y Zimmermann (2000).

SIMULACIÓN DE PROCESOS MEDIANTE MODELOS MATEMÁTICOS

Necesidad de emplear modelos de simulación

El objetivo final de la investigación de los procesos hidrológicos desarrollados en grandes llanuras, es la de contribuir a la mejor utilización de

los recursos naturales de estas áreas, entre los cuales el suelo y el agua son los más importantes.

Dado que este objetivo implica, no solamente el conocimiento de una situación actual, sino que es imprescindible predecir el comportamiento posible del sistema para distintas situaciones, extremas o no, naturales o inducidas, se hace necesario simular su comportamiento.

En esta simulación se debe intentar representar las particularidades de los sistemas de llanura, por lo que los modelos conceptuales disponibles desarrolladas en el marco de la Hidrología Clásica, resultan de difícil aplicación y, a veces, inadecuados (Fertonani y Prendes 1983, Kovacs 1983). Es necesario, adaptar o desarrollar modelos de simulación aptos para la hidrología de llanura. Al respecto, la Hidrología Comparada (Falkenmark y Chapman 1989) ofrece un encuadre metodológico para el análisis de los sistemas hidrológicos.

Paralelamente, existe una fuerte tendencia hacia el desarrollo de modelos que describan los procesos físicos en términos de parámetros fuertemente vinculados a propiedades físicas, mensurables en campo o experimentalmente (Soczynska et al 1983). De tal manera, los mismos pueden estimarse a priori y sin la necesidad de recurrir a técnicas de optimización. En consecuencia, los modelos pueden aplicarse regionalmente a sistemas hidrológicos sin datos.

Antecedentes en la región.

En términos generales, las experiencias de modelación pueden asociarse a la generación de códigos computacionales para la zona saturada con el fin de gestionar el recurso hídrico.

Los primeros modelos matemáticos cobran difusión en los años '70. Prickett y Lonquist (1971) presentan un código computacional para la resolución de la ecuación de Boussinesq aplicada a un acuífero libre en el dominio bidimensional. Como primer antecedente este tipo de modelos (el código JAIM3) fue aplicado en la década del 70 en un área de 960 km² contigua a la ciudad de La Plata y en la cuenca del Río Matanzas (ambas en provincia de Buenos Aires, Argentina).

A posteriori, el Departamento de Cooperación Técnica para el Desarrollo de las Naciones Unidas desarrolló una serie de programas para la gestión del recurso hídrico subterráneo, que incluyen modelos

de acuíferos costeros, confinados y libres en el dominio bidimensional (Karanjac y Braticovic 1989). El módulo GW8 para acuíferos libres fue aplicado al sistema hidrológico del arroyo Ludueña, provincia de Santa Fe (Zimmermann 1994).

Bocanegra y Benavente (1994) aplican el código CONFINE-2 para la modelación en régimen transitorio para el acuífero confinado costero de Mar del Plata (pcia. de Buenos Aires).

Riccardi y Zimmermann (1999) presentan un modelo de flujo subterráneo en el dominio 2D, basado en esquemas de celdas o volúmenes de control. Estos esquemas de discretización numérica presentan una gran versatilidad para la simulación de elementos de características heterogéneas. Las celdas definen una unidad de discretización espacial, no necesitan estar equiespaciadas ni conservar las mismas propiedades físicas estando vinculadas entre sí por las leyes que correspondan al tipo de flujo entre dichos elementos. Los flujos de intercambio y las variables de estado se resuelven dinámicamente en un mismo sistema de ecuaciones.

Actualmente se han hecho esfuerzos en acoplar códigos computacionales que simulan procesos que se dan en diferentes ambientes. Para interrelacionar escurrimientos junto a flujos en la ZNS, Reyna y Reyna (1999) proponen el acoplamiento de las ecuaciones de Saint-Venant y Richards mediante los códigos HEC-1 y SWMM incorporándoles subrutinas de intercambio.

Pavese y Rodríguez (1998) analizan la interacción río-acuífero mediante las ecuaciones de Boussinesq para simular el flujo saturado y la ecuación de onda cinemática para el flujo

encauzado, integrándolas numéricamente mediante elementos finitos.

Para analizar la interacción dren-acuífero el modelo MODFLOW presente un módulo específico el cual demanda el perfil de cargas hidráulicas en el dren que debe suministrarlo externamente el usuario. Para ello Cello Villar y Rodríguez (2002) proponen el acoplamiento de los códigos HEC-RAS, para simular la dinámica superficial de los drenes, y MODFLOW, para simular el flujo subterráneo hacia los drenes. Zimmermann y Riccardi (2000) proponen la simulación de la interacción dren-acuífero y de la hidrodinámica de los drenes conjuntamente con estaciones de bombeo mediante esquemas de celdas. El código desarrollado, CELSUB3, fue aplicado para el diseño de un sistema de drenaje urbano en la localidad de Chañar Ladeado (Santa Fe).

Zimmermann y Riccardi (2002) presentan en este encuentro un modelo matemático de simulación hidrológica cuasi-3D que contempla las interacciones entre los procesos de superficie, de la ZNS y de la zona saturada. La estructura matemática se basa en las ecuaciones de conservación de masa y energía. En cada celda ó unidad de discretización espacial, el modelo SHALL3 cuantifica dinámicamente variables de estado (almacenamientos por intercepción, superficial, en el perfil del suelo y subterráneo) y flujos de intercambio (evapotranspiración, ascenso capilar, escurrimiento superficial, mantiforme y encauzado, a superficie libre y a través de constricciones, infiltración, percolación profunda y escurrimiento subterráneo). La estructura de la modelación permite la discretización del dominio espacial en "capas" de celdas superficiales y subterráneas, sobre las que se evalúa el intercambio de flujos horizontales, vinculadas por modelos de flujos verticales en la ZNS (Figura 6).

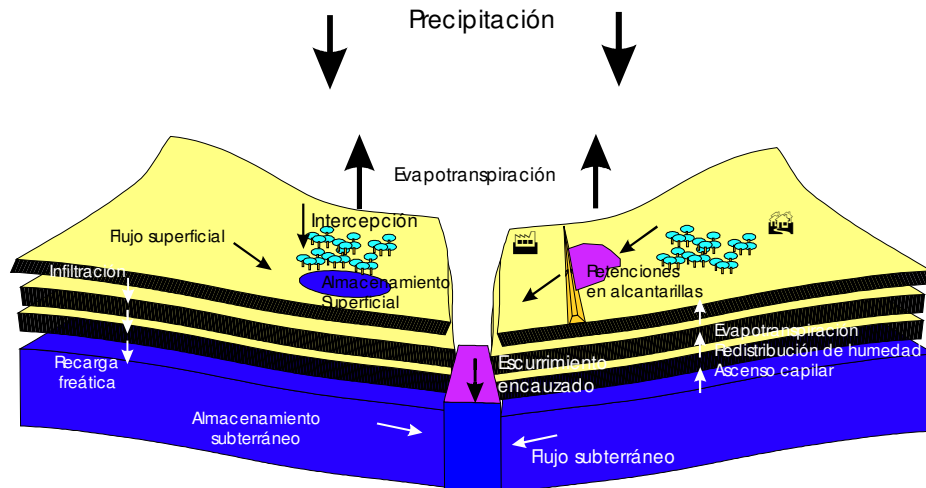


Figura 6. Esquematación del ensamblaje entre celdas superficiales, no saturadas y subterráneas

En el modelo, los procesos se simulan individualmente, no obstante, existen mecanismos de interacción entre procesos en superficie y en ZNS y entre ésta y la ZS. La modelación de la ZNS está basada en la ecuación de Richards, para estimar la redistribución de humedad y los montos de agua intercambiados con la atmósfera y el acuífero. El medio poroso no saturado es representado en forma discreta mediante un conjunto de celdas que se extienden verticalmente desde la superficie hasta el nivel freático.

Los submodelos de flujos horizontales, tanto el superficial como el subterráneo, se basan en esquemas de celdas. El flujo superficial puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga que permiten la simulación de tránsito por ríos, canales, valles de inundación, calles urbanas, redes de conductos cerrados, puentes, sumideros, vertederos, embocaduras de conductos y estaciones de bombeo. El flujo subterráneo es simulado mediante la ecuación de Darcy.

La aptitud que presenta el modelo de conectar la hidrología de superficie con la subterránea, lo habilita para realizar predicciones acerca de evoluciones en los procesos hidrológicos provocados por acciones antrópicas a escala de cuenca y en el largo plazo. El modelo fue empleado para evaluar los efectos ambientales que provocaría un hipotético riego generalizado sobre el sistema hidrológico del Ao. Ludueña (Santa Fe, Argentina). La simulación fue realizada durante un período de 20 años, donde las series de entrada, precipitación y evaporotranspiración, fueron generadas sintéticamente.

El progresivo incremento de las necesidades de agua debido a la expansión de la urbanización en distintas regiones de la llanura Pampeana ha generado una intensa explotación del agua subterránea, pero también ha generado problemas de contaminación a partir de efluentes industriales, agrícolas, etc. La simulación de la migración de plumas contaminantes de metales pesados y otros compuestos han demostrado que en general el transporte es muy lento en el medio saturado, dado por la influencia de la permeabilidad y los escasos gradientes hidráulicos, dependiendo la afectación de las aguas subterráneas de la persistencia de la fuente contaminante. Esas mismas características hacen dificultosa cualquier estrategia de remediación (Kohn et al, 1999, Kohn et al, 2001)

Calibración y aplicación de modelos

Si bien se recomienda que los modelos hidrológicos sean concebidos con parámetros de base física, en algunos casos, frente a incertidumbres o heterogeneidades en terreno es conveniente realizar ajustes para lograr una mejor identificación entre modelo y prototipo.

Durante la calibración de modelos aptos para simulación en llanuras, se ha demostrado la alta sensibilidad que presentan los procesos subterráneos (ej. observables en el sistema mediante los niveles freáticos) y los procesos hidrológicos superficiales (ej. observables a través de volúmenes de escurrimiento) frente a los parámetros que caracterizan la ZNS (Zimmermann 2002). Esto resalta el rol protagónico que ejerce la zona vadosa en la recarga freática y en la infiltración, que constituyen los procesos que interconectan la hidrología

superficial y la subterránea.

En el desarrollo de las diferentes etapas de la calibración, es manifiesta la imposibilidad de realizar ajustes parciales de los parámetros que gobiernan la hidrología de superficie y la subterránea, resultando necesaria una calibración global que incluya todos los parámetros en conjunto.

La función objetivo propuesta condiciona los juegos de parámetros óptimos. En consecuencia, la misma deberá contemplar un buen pronóstico de los escurrimientos en superficie, de las recargas subterráneas y de los niveles freáticos junto a sus tendencias evolutivas en el tiempo.

CONCLUSIONES

El presente trabajo intenta describir las particularidades hidrogeológicas que presenta la llanura Pampeana argentina. Si bien las llanuras no presentan comportamientos homogéneos, las mismas pueden servir de guía y aplicarse a otros sistemas hidrológicos de morfologías semejantes.

El avance del conocimiento en éstos escenarios hidrológicos atípicos se ha estructurado sobre la readaptación de herramientas tecnológicas aptas para otros ambientes. Hay una gran falencia en el campo de las mediciones de variables hidrológicas y en el desarrollo de modelos apropiados para simular los procesos dominantes de la llanura, aspectos que fueron planteados como prioritarios en el Coloquio de Hidrología de Grandes Llanuras (Olavaria, Argentina, 1983).

En tal sentido resulta significativo indicar la necesidad de avanzar en una caracterización más detallada de los niveles acuíferos, tanto en lo relacionado a su configuración (variación litológica, de espesores, parámetros hidráulicos) como en su comportamiento hidrodinámico e hidroquímico natural o afectado por las actividades del hombre. Asociado a ello debe vincularse una evaluación detallada de las reservas de agua dulce de las aguas subterráneas y los procesos de recarga. Debe efectuarse un seguimiento de su evolución influenciadas por las condiciones climáticas, la explotación intensiva y el deterioro a partir de problemas de contaminación.

Dado que toda intervención humana sobre éstos sistemas de alta sensibilidad puede ocasionar

consecuencias ecológicas en grandes áreas, la predicción de los impactos requiere estudios interdisciplinarios profundizados. Los modelos de simulación de los procesos hidrológicos deberán orientarse a las particularidades propias de la dinámica en llanura y deberán utilizarse para estimar los cambios esperados y para orientar las acciones antrópicas dentro del ambiente (modelos de manejo).

Los estudios deberán proveer suficiente información a los responsables de tomar decisiones sobre los impactos esperados a largo plazo de las distintas opciones de las actividades de utilización y manejo del suelo y agua. Las medidas a tomar deberán ser seleccionadas siempre, considerando, no sólo los beneficios y costos directos, sino también su impacto socioeconómico, incluyendo además cambios inmediatos y a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bras RL, Rodríguez-Iturbe I. (1976) Rainfall Generation: A Non Stationary, Time Varying Multidimensional Model. *Water Resources Research*, 12(3), 450-456.
- Bocanegra EM, Benavente MA. (1994) Simulación numérica del sistema de flujo de las aguas subterráneas en Mar del Plata, Argentina (período 1920-1969). **In:** II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. 2: 213-224. ALHSUD. Santiago. Chile.
- Cello Villar P, Rodríguez L. (2002) Modelación hidrodinámica de un sistema de drenaje en el contexto de la simulación numérica del flujo subterráneo. **In:** XIX Congreso Nacional del Agua. Carlos Paz. Argentina (aceptado para su publicación).
- Díaz EL, Pérez MA, Fili MF. (1999) Prognosis de la sustentabilidad de un sistema hidrogeológico complejo en el sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. **In:** Alfredo Tineo (ed.) *Hidrología Subterránea*. Serie Correlación Geológica No. 13, IAH, UNESCO-PHI. Tucumán, Argentina. 371-377.
- Falkenmark M, Chapman T. (1989). *Comparative Hydrology*. International Hydrological Programme. UNESCO.
- Fernandez N, Hämmerly R. (2001). Desarrollo e implementación de un modelo de balance vertical. **In:** Seminario Internacional sobre manejo integral de cuencas hidrográficas. T-63 soporte digital. Rosario. Argentina. 9 p.
- Fertonani M, Prendes H. (1983) Hidrología en Areas de Llanura, Aspectos Conceptuales, Teóricos y Metodológicos. **In:** Coloquio sobre Hidrología de Grandes Llanuras. I:119-156. PHI-UNESCO. Olavarría. Argentina.
- Fidalgo F (1983). Algunas características de los sedimentos superficiales de la Cuenca del Río Salado y Pampa Ondulada. **In:** Coloquio sobre Hidrología de

- Grandes Llanuras. II: 1044-1067. PHI – UNESCO. Olavaria.
- Fuschini Mejia MC (1983) Editor. Hidrología de Grandes Llanuras. Actas del Coloquio de Olavaria. PHI – UNESCO. Olavaria.
- González N, Trovatto MM, Hernández MA (2002). Modelo hidrodinámico en una cuenca de llanura tributaria del Río de La Plata (Buenos Aires, Argentina). **In:** XXXII IAH & VI ALHSUD Congress 2002. (En prensa).
- Hernández MA, Filí M, Auge M, y Ceci JH. 1979. Geohidrología de los acuíferos profundos de la Provincia de Buenos Aires. **In:** VI Congr. Geol. Arg. (II), 479-500. Buenos Aires.
- Jaworsky J. (1978) A mathematical model of actual evapotranspiration. *Journal of Hydrological Sciences*. 5 (3). 179-189.
- Karanjac J, Braticevic D. (1989). Groundwater Software: User's Manual. UN/DTCD Water Resources Branch.
- Kohn J, Kruse E, Santos J (1999). Behaviour of contaminant plumes at the interface between the Pampeano and Puelche aquifers in the Province of Buenos Aires. *IAHS Publication no. 260: 81-86*.
- Kohn J, Kruse E, Santos J. (2001) Lead contamination of groundwater in the northeast of Buenos Aires Province, Argentina. *IAHS Publication N° 269: 323 – 330*.
- Kovacs G. (1983) General Principles of Flatlands Hydrology. **In:** Coloquio sobre Hidrología de Grandes Llanuras. I: 297-356. PHI-UNESCO. Olavarría. Argentina.
- Kruse E, Rojo. A. (1987). Una interpretación de los conos de depresión de Mar del Plata (Argentina) en relación a la estimación de evapotranspiración. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos: XI, 827-836*. España.
- Kruse E. (1992a) El agua subterránea y los procesos fluviales en la región centro - oriental de la Provincia de Buenos Aires. *Situación Ambiental de la Provincia de Buenos Aires: II: 15 (13-31)*. Comisión de Investigaciones Científicas. La Plata.
- Kruse E. (1992b) Estimación de escurrimientos subterráneos en la cuenca del Ao. Azul (Buenos Aires). *Situación Ambiental de la Provincia de Buenos Aires: II: 15 (1-12)*. La Plata.
- Kruse E. (1993) Técnicas de estudio en llanura. Caso: Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. **In:** Seminario Hispano Argentino sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea: 287-298. Mar del Plata.
- Kruse E, Forté Lay JA, Aiello JL, Basualdo A, Heinzenknecht G. (2001) Hydrological Processes on Large Flatlands. Case Study: Northwest region of Buenos Aires Province (Argentina). *IAHS Publication N° 267: 531 – 536*.
- Kruse E, Ainchil, J. (2000) Assessment of fluoride concentration in groundwater, Saldungaray, Argentina. **In:** Groundwater: Past Achievements and Future Challenges: 545 – 548. A.A. Balkema. Rotterdam.
- Laurencena P, Varela L, Kruse E (1999). Variación de la recarga subterránea. Cuenca Arroyo El Pescado (Provincia de Buenos Aires). **In:** Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. U. N. La Pampa. Santa Rosa (La Pampa).
- Laurencena P; Varela L; Kruse E; Rojo A, Deluchi; M. (2002). Características de las variaciones freáticas en un área del Noreste de la Provincia de Buenos Aires. **In:** XXXII IAH & VI ALHSUD Congress 2002. (En prensa).
- Le Cam, L. (1961). A Stochastic Description of Precipitation. **In:** Neyman J. (ed.) *Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 3, Berkeley, California. 165-186.
- McDonald MG, Harbaugh A (1988) A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. Techniques of water resources investigations of the USGS, part 2, US Government Printing Office, Washington. USA.
- Monteith, J (1965) Evaporation and environment. **In:** Symp. Soc. Exp. Biol. Vol. 19. Swansea, 205-234.
- Pavese J, Rodriguez L. (1998) Análisis de la influencia del riego sobre el ascenso del nivel freático. **In:** XVII Congreso Nacional del Agua- II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. 3:90-98. Santa Fe. Argentina.
- Prickett TA, Lonquist CG. 1971. Selected digital computer techniques for ground water resources evaluation. Illinois State Water Survey, Bull 55, Urbana.
- Reyna SM, Reyna TM. (1999) Interacción de los procesos de escorrentía e infiltración. **In:** Alfredo Tineo (ed.) *Hidrología Subterránea*. Serie Correlación Geológica No. 13, IAH, UNESCO-PHI. Tucumán, Argentina. 335-344.
- Riccardi G, Zimmermann E. (1999) La Modelación Matemática Bidimensional de Escurrimiento Subterráneo mediante Esquemas de Celdas. [The two-dimensional mathematical modelling of groundwater flow by cell schemes]. **In:** Tineo A (ed.) *Hidrología Subterránea*. ISSN 1514-4186, Instituto Superior de Correlación Geológica-CONICET, Tucumán, 79-88.
- Riccardi G y Zimmermann E. (2000) Modelo Probabilístico de Tormentas Puntuales aplicado a Rosario Aero (Santa Fe, Argentina). **In:** XVIII Congreso Nacional del Agua. Termas de Río Hondo. Sgo. Del Estero. ISBN 987-99083-4-1. 57-58 (libro y CD ROM).
- Sala JM (1975) Recursos Hídricos. Especial Mención de las Aguas Subterráneas. **In:** Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires: 169-193. VI Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca.
- Sala JM, Kruse E. (1979) Estimación de transmisividad regional en base al balance hidroquímico de arroyos. **In:** Actas IX° Cong. Nacional del Agua. T. II, pp. 141-148. San Luis. 1979.
- Sala JM. (1981). Geología de Cuencas de Llanura con énfasis en Hidrogeología. Comité de Cuencas Hídricas Area del Gran Rosario. Rosario.

- Sala JM, Hernández MA, Kruse E. (1982). Groundwater regime forecasting with inadequate data in Argentina. *IAHS. Publ.Nº 136*: 314-324. Exeter (Inglaterra).
- Sala JM, González N, Kruse E. (1983) Generalización hidrológica de la Provincia de Buenos Aires. **In:** Coloquio sobre Hidrología de Grandes Llanuras. II: 973-1009. PHI – UNESCO. Olavaria.
- Sala JM, Kruse E, Rojo A (1985). La geohidrología en los procesos de anegamiento de la zona deprimida del Salado. Actas **In:** 1º Jornadas Geológicas Bonaerenses, pp. 431-447. CIC. Bahía Blanca.
- Sbarra N (1973). Historia de las aguadas y el Molino. EUDEBA. 191p. Buenos Aires.
- Scanlon B, Healy R y Cook P. (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*. 10 (1). 18-39. Springer-Verlag. Germany.
- Schulz C, Oleaga A, Dornes P, Pacheco F. (1998) Evaluación y gestión de los recursos hídricos subterráneos para el abastecimiento de agua a la ciudad de General Acha, LAPampa, Argentina. **In:** IV Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. 1: 486-499. ALHSUD. Montevideo. Uruguay.
- Silber M. (1985) Algoritmo de Cálculo y Representación de los Campos Paramétricos Continuos. **In:** XII Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Argentina.
- Soczynska U, Gutry-Korycka M y Jaworsky J (1983) Identification of basin physical parameters for mathematical modelling hydrological processes. **In:** Coloquio de Hidrología de las Grandes Llanuras. Vol. II. 569-610. PHI-UNESCO. Olavarría. Argentina.
- Stappenbeck R (1926). Geologie und Grundwasserkunde. Stuttgart
- Usunoff E, Varni M, Weinzettel P, Rivas R. (1999) Hidrogeología de grandes llanuras: La pampa húmeda argentina. *Boletín Geológico y Minero*. 110 (4). 391-406. ITGE-IAH-UNESCO.
- Varni M, Usunoff E. 1999. Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires province, Argentina. *Hydrogeology Journal*. 7 (2) 180-187.
- Windhausen A. (1931). Geología Argentina. Tomos 1 y 2. Ediciones Peuse. Buenos Aires.
- Yrigoyen M. 1975. Geología del subsuelo y plataforma continental. **In:** Geología de la Provincia de Buenos Aires. VI Congr. Geol. Arg. Relatorio, 140-168. Buenos Aires.
- Zambrano J. 1974. Cuencas sedimentarias en el subsuelo de la Provincia de Buenos Aires y zonas adyacentes. *Rev. Asoc. Geol. Arg.* XXIX (4), 443-469. Buenos Aires.
- Zimmermann E. (1994) Evolución Temporal de Niveles Freáticos y de las Zonas de Interacción con la Hidrología Superficial en un Area de Llanura. [Time evolution of water-table, and surface interaction zones in a flatland area] **In:** II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Sgo. de Chile, Chile.
- Zimmermann E, Navarro R, Silber M. (1996) Un Modelo Probabilístico para la Generación Sintética de Tormentas. **In:** XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica; IAHR; Guayaquil; Ecuador.
- Zimmermann E. (1999) Assessment of hydrological changes associated to irrigation projects in a flatland area (Santa Fe, Argentina). *Journal of Environmental Hydrology*. IAEH. 7(1).
- Zimmermann E., Riccardi G. (2000) Hydrodynamic model of cells for designing systems of urban groundwater drainage. *Hydrogeology Journal*. Springer Ed. IAH. Vol . 8. Nº 5. pp 538-548.
- Zimmermann E, Riccardi G (2002). Modelo hidrológico superficial y subterráneo desarrollado para la simulación de sistemas de llanura. **In:** XXXII IAH & VI ALHSUD Congress 2002. (En prensa).
- Zimmermann E, Silber M. (2002) Algoritmo para la Representación de Campos de Precipitación. **In:** XIX Congreso Nacional del Agua. Carlos Paz. Córdoba (en prensa).
- Zimmermann E (2002). Estrategias para la calibración de un modelo hidrológico superficial y subterráneo de alto nivel de detalle. **In:** XXXII IAH & VI ALHSUD Congress 2002. (En prensa).