

# AGUAS SUBTERRANEAS Y CAMBIOS CLIMATICOS

Prof. Dr. Mario A. Hernández (\*)

## 1. INTRODUCCION

Es probable que las discusiones instaladas acerca del cambio climático, fundamentalmente si se trata de un cambio global o secular, si está originado en el ciclo natural o cuenta con una decisiva participación antropogénica, si sus efectos son potenciales y a muy largo plazo o ya instalados, estén principalmente enfocadas a los episodios más visibles, como anegamientos en regiones costeras, deslaves en comarcas montañas, cambios en los ecosistemas terrestres.

Puede decirse que la discusión a nivel científico se instala desde la Reunión de la Organización Meteorológica Mundial (WMO) llevada a cabo en Londres en 1960, específicamente radicada en su Comisión de Climatología, en la cual se crea un Grupo de Trabajo sobre el tema.

En 1961 y durante el Simposio sobre Cambios del Clima (WMO, Roma) el tema es retomado con preocupación, produciéndose en 1966 el primer artículo esencial (IPCC, 1990).

Las Naciones Unidas crean en 1990 el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), constituido por reconocidos científicos provenientes de todas las regiones del planeta y dirigido por 2 agencias especializadas: la Organización Meteorológica Mundial y el PNUMA. El Panel, conocido como IPCC, según sus siglas en inglés, produjo informes claves sobre el estado y evolución del sistema climático y acerca de los impactos sobre él producidos por las actividades humanas.

Originó sucesivos documentos publicados en 1990, 1992, 1995, 1997 y 1998, alertando sobre el aumento de la temperatura en la superficie terrestre y la elevación del nivel del mar, que habría comenzado como consecuencia de la emisión antropogénica de gases de efecto invernadero (GEI), la cual es significativa y se incrementa constantemente desde el comienzo de la era industrial.

El Informe de Evaluación Climate Change (1990) confirma la evidencia científica acerca de los cambios climáticos, con un fuerte efecto sobre los decisores políticos y público en general, suministrando las bases fundamentales para las negociaciones ulteriores de la Convención de Cambio Climático y culminando con la obtención del Premio Nobel de la Paz 2007 para el IPCC.

(\*) *Profesor Titular UNLP. Investigador Científico CONICET.*

Una de las prevenciones del IPCC es que “*se cuenta con información inadecuada para determinar si han ocurrido cambios consistentes en la variabilidad climática a lo largo del siglo*”, indicado la dificultad de predecir cómo los cambios climatológicos pueden interactuar con las variables del estado del tiempo local (IPCC, 1990).

Si bien las alusiones a las influencias de los cambios en el ciclo hidrológico global son frecuentes, están referidas en general a la precipitación pluvial, la temperatura atmosférica y el nivel del mar.

No se incluyen mayores referencias acerca del sistema hidrológico subterráneo, probablemente debido a la reconocida carencia de mediciones demostrativas suficientes y a la marcada debilidad de las inducciones emanadas de la paleoclimatología.

En síntesis, los hitos históricos tratan fundamentalmente sobre el origen de los cambios, las verificaciones de alcance global (fundamentalmente térmicos y de oscilaciones del nivel del mar) y las consecuencias previsibles sobre el régimen superficial.

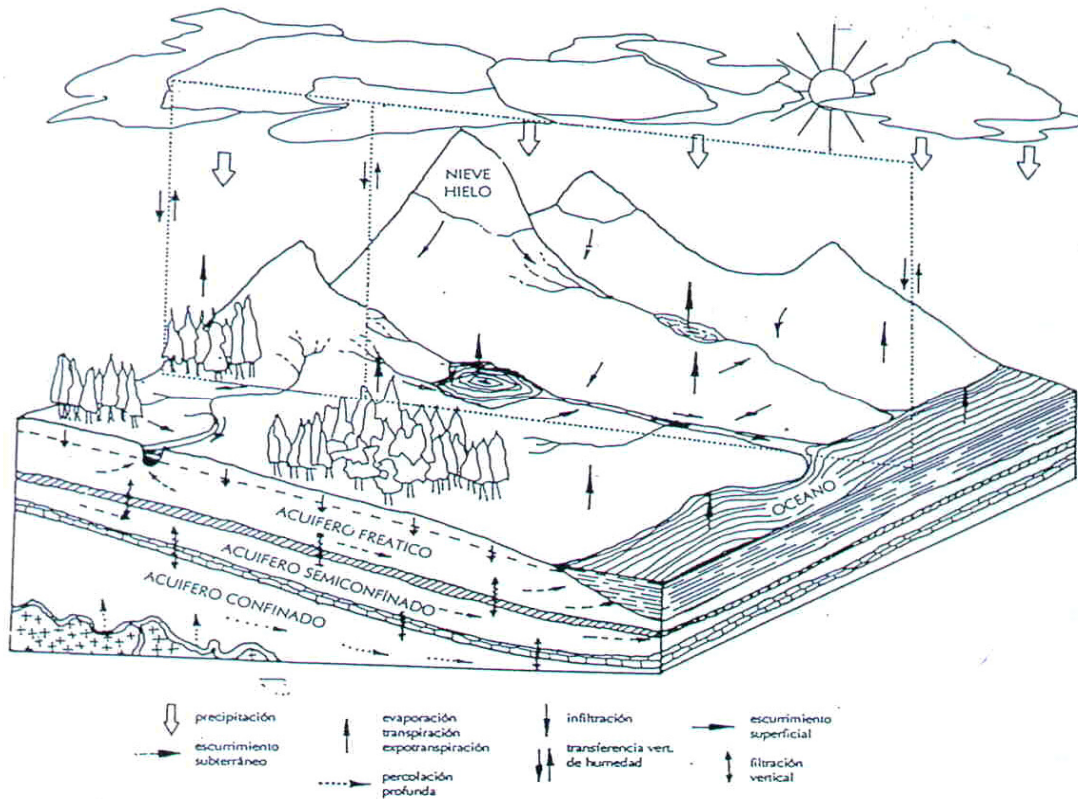
Sin embargo, el régimen de aguas subterráneas pese a no contar con indicaciones precisas, resulta uno de los sujetos más afectables por un posible cambio climático, dadas sus particularidades en el contexto del ciclo hidrológico.

Es conocido que este ciclo (Figura 1), mecanismo de alta perfección motorizado esencialmente por la energía solar, se caracteriza por una constante (el volumen de agua involucrado, conforme al principio de conservación de la masa) y tres variables (Hernández y González, 1993).

Son éstas el estado del fluido (sólido, líquido, gaseoso), la calidad (natural o antropogénica) y el régimen. Es precisamente esta última la más vinculada a la problemática de los cambios climáticos, ya que el arco terrestre subterráneo del ciclo es de muy baja velocidad, especialmente en ambientes de llanura.

De tal forma, existe un retardo entre la ocurrencia de los pulsos de recarga pluvial y su manifestación en las aguas subterráneas.

Idénticamente, la persistencia de las consecuencias físicas de precipitaciones crecientes son mucho más notables que en el arco terrestre superficial.



**Figura 1. Ciclo hidrológico**

Esta contribución está dirigida a caracterizar los posibles efectos de los cambios climáticos en un ámbito no muy conocido, fundamentalmente por hallarse oculto a la percepción directa, pero cuya respuesta a los eventos exógenos tarda bastante en manifestarse. En general, los efectos se evidencian mucho tiempo después de la causa origen, inclusive aún desaparecida esta.

Se pone énfasis en dos rasgos muy destacados del territorio nacional que tienen mucho que ver con la problemática: dos terceras partes de su superficie corresponden a regiones áridas o semiáridas. La mitad, a paisajes de llanura.

La Provincia de Buenos Aires reúne ambas características: regiones sub-húmedas y semiáridas y la mayor parte de su geografía de características netamente llanas, con un importante litoral marítimo.

Como además cuenta con una relativamente buena densidad de información histórica en comparación con otras, ha sido tomada en este trabajo como ambiente para el desarrollo de las principales hipótesis

## **2. ESCENARIOS DEL PASADO GEOLOGICO**

Cuando se discute sobre los cambios climáticos (sean estos seculares o globales), se presta especial atención a los indicadores, causas y efectos actuales y su proyección, olvidando muchas veces la premisa del ciclismo de los fenómenos que los geólogos tienen internalizada por las dimensiones de tiempo que manejan.

Quiere decirse que los cambios climáticos del pasado, más pronunciados y extendidos que los actualmente percibidos, resultan una clave fundamental para el entendimiento de estos últimos.

Argentina, especialmente la Patagonia extrandina, es un escenario de los más completos en el mundo para la reconstrucción paleoclimática, en función de la cronología de las glaciaciones ocurridas en el Terciario Superior desde 5 a 7 millones de años antes del presente (Rabassa et al., 2005).

Ocho episodios de glaciaciones se sucedieron hasta la denominada Gran Glaciación Patagónica (1,17 a 1,02 millones de años), a la cual sucedieron al menos 14-16 épocas geoclimáticas frías. Todos estos eventos fueron intercalados por sus correspondientes intervalos cálidos, inclusive los dos últimos ocurridos apenas 15000-10000 años antes del presente (Tardiglacial) según Rabassa et al., 2005.

Los cambios climáticos y ambientales que acaecieron durante todo ese tiempo tuvieron influencia tanto en el paisaje como en la geología, fauna y flora e incluso el sistema hídrico subterráneo durante los últimos 5 millones de años, alcanzando al territorio pampeano. El reemplazo de la fauna de estirpe patagónica por brasílica y la desaparición de la megafauna pampeana son dados por Rabassa et al. (2005) como demostrativos de la influencia de los cambios climáticos.

A título de ejemplo, en las últimas glaciaciones la variación térmica media habría superado los 3-4<sup>o</sup> C.

Los herramientas diagnósticas de que se valen los geólogos investigadores del clima del pasado son diversas (Coronato et al., 2004), pudiendo mencionarse como relevantes el estudio de los depósitos glaciales (morenas), intrusiones marinas, testigos de hielo, dataciones por isótopos cosmogénicos, palinología (estudio del polen fósil), paleobotánica, paleontología, permafrost (suelos congelados). El lapso involucrado va desde el Terciario Mioceno hasta épocas recientes coincidentes con el inicio del poblamiento humano de la Patagonia austral.

Ya en vinculación con el arco terrestre subterráneo del ciclo hidrológico, es indudable que las variaciones térmicas de por sí y por su influencia en el ascenso en el nivel de mar han tenido influencia en el régimen de los sistemas acuíferos.

En el primer caso, mediante un desequilibrio de los balances hidrológicos según la relación precipitación (pluvial o nival) / evapotranspiración, especialmente en aquellos escenarios donde los máximos pluviales coincidían con los meses de menor temperatura y por consiguiente con menores pérdidas consuntivas (ascenso al menos estacional de los niveles de agua) o temperaturas altas coincidiendo con menores aportes meteóricos (descenso de los niveles).

Más verificables son los cambios introducidos en las zonas costeras, cuyo testimonio es aportado por los materiales geológicos correspondientes a las intrusiones marinas, asociados a geformas típicas en el actual litoral atlántico (bonaerense y patagónico).

Los indicios de mayor peso están dados por las características de los paleosuelos y en el caso de la llanura pampeana, por la presencia de espesores calcáreos ("tosca"), cuya génesis es atribuida con fundamento a las oscilaciones de la franja de agua capilar que acompaña al nivel freático. Sucesivos ascensos y descensos capilares junto con variaciones térmicas habrían sido responsables de la formación de estos verdaderos bancos, por precipitación de carbonato de Calcio.

Puede rescatarse en avance al Capítulo 4, que las "toscas" se reconocen en perfiles geológicos de sitios alejados de la entonces línea de costa de cada momento, lo cual sirve de base a algunos de los planteos de escenarios futuros.

### **3. CAMBIOS SECULARES Y ANEGAMIENTOS**

En la última década del siglo pasado, Canziani et al. (1993) utilizan los cambios en el régimen pluviométrico de carácter secular para la comarca noroccidental de la Provincia de Buenos Aires (es ese entonces ya con una persistencia de más de veinte años), como prototipo de posible cambios globales.

A doce años de aquella contribución, los sucesos hidrológicos acaecidos marcaron en general que las presunciones originales tenían su asidero a través de la realidad sucedente.

A partir de aproximadamente 1970 se registra en gran parte de la región pampeana bonaerense un incremento de pulsos pluviales paulatinamente ascendentes, desembocando en la década de los '80 en sucesos de anegamientos que involucraron vastas extensiones de la llanura, con las consiguientes secuelas físicas y socioeconómicas (Saravia et al., 1987; Benavidez et al., 1993).

Tradicionalmente, estos episodios eran adjudicados al exceso de los aportes meteóricos y su correlato superficial, pero a partir de la década de los '70 empezó a percibirse claramente la participación del régimen subterráneo, ya que al ascender la superficie freática (o al menos la franja capilar adosada) en forma persistente incluso hasta aflorar, desaparece paulatinamente la capacidad de disipación subterránea de la energía.

Todo nuevo aporte, sin la posibilidad del ingreso subterráneo (fenómeno denominado recarga rechazada) ni de la evacuación superficial al tratarse de comarcas endorreicas o exorreicas de mínima pendiente, no tiene otro destino que la atmósfera o acumularse en superficie, derramando a modo de anegamientos cubriendo amplias superficies, al superarse la capacidad de almacenaje superficial (Saravia et al., 1987).

Este escenario real y comprobado es uno de los habitualmente no tenidos en cuenta al momento de razonar sobre los efectos de los cambios climáticos sobre las aguas subterráneas.

Normalmente se enfatiza sobre los acuíferos costeros, en vinculación con los cambios en el nivel medio del mar que si bien son efectos esperables y quizás dramáticos, no son sin duda los únicos, como se intentará demostrar.

La observación de las series pluviométricas y termométricas (menos extensas estas últimas) permite advertir que en la región pampeana el ciclo iniciado en 1970 no reconoce antecedentes de persistencia para los records seculares, pese a que existen eventos pico puntuales máximos fuera del período.

Un detalle de este ciclo excedentario en la mencionada región permite a su vez distinguir que el mayor peso en los incrementos `pluviales está radicado en el semestre cálido.

El interrogante básico sobre la experiencia real de las consecuencias referidas de un ciclo lluvioso excepcional para el siglo XX y lo que va del XXI, radica en poder saber si puede ser prototipo de un cambio de mayor alcance temporal (Canziani et al., 1993).

Sobre todo teniendo en cuenta que ha afectado esencialmente a la función de entrada al sistema subterráneo (precipitación) y no a la de salida (evapotranspiración), ya que las variaciones térmicas son de escasa significación para el lapso (del orden de una décima de grado centígrado o fracción), pero pueden acentuarse en el futuro.

Coherentemente con este razonamiento y a título de hipótesis, se plantean a continuación posibles escenarios para cambios climáticos acaecibles en el ámbito de la llanura pampeana y sus implicancias en el régimen de las aguas subterráneas.

#### **4. POSIBLES ESCENARIOS FUTUROS**

Muy frecuentemente se asocian los efectos de un posible futuro cambio climático, al impacto que provocaría sobre los acuíferos costeros el ascenso global del nivel del mar, asociándolo con problemas de intrusión salina y anegamientos de regiones costeras, como consecuencia de la elevación del nivel de base de descarga del régimen subterráneo.

Si bien estos problemas son pasibles de manifestarse, no son los únicos, ni los más extendidos regionalmente, ni tal vez los de mayor implicancia socioeconómica pese a tratarse de sectores donde los valores contenidos son

de gran importancia, por la actividad turística y asociada que muchos de ellos poseen.

En primer lugar, los posibles cambios climáticos no serían del mismo signo, es decir no debería producirse un incremento uniforme de los aportes pluviales unívocamente en todo el planeta, sino que escenarios húmedos pueden tornarse en hiperhúmedos, semiáridos en sub-húmedos, pero también semiáridos en áridos o sub-húmedos en semiáridos.

Las propiedades del ciclo hidrológico mencionadas en la Introducción (especialmente la constancia del volumen de agua y la variabilidad del régimen) avalan esta afirmación, además de los condicionantes meteorológicos, climatológicos, geográficos e hidrológicos.

Suponiendo que el signo sea como parecen indicarlo las evidencias actuales, de mayor pluviosidad, temperatura e incremento del nivel medio del mar, en el caso de los acuíferos costeros (especialmente el primero o freático) va a experimentar un paulatino ascenso, por elevación del nivel de base (nivel del mar).

Los espacios más vulnerables serían lógicamente el litoral del río de La Plata y Bahía de Samborombón y la ría de la Bahía Blanca, ya que la mayor parte de la costa atlántica está relativamente protegida por la cadena de dunas que se prolonga desde el Cabo San Antonio hasta Santa Clara del Mar, y desde Chapadmalal hasta Monte Hermoso, con un interregno dado por el afloramiento del sistema serrano de Tandilla a la altura de Mar del Plata que no sería mayormente afectado.

Dentro de este panorama, la elevación de los niveles de agua subterránea debería ser paulatina y poco mensurable a escala anual, producida por una concurrencia de factores ya que además de la nueva posición más alta del nivel medio del mar hay que considerar la mayor dificultad en el drenaje superficial por la misma razón, originándose el derrame en el sector de desembocadura, una mayor franja intertidal y más dificultoso acceso del caudal básico, ya que se trata de cursos francamente ganadores o efluentes, es decir receptores de agua subterránea.

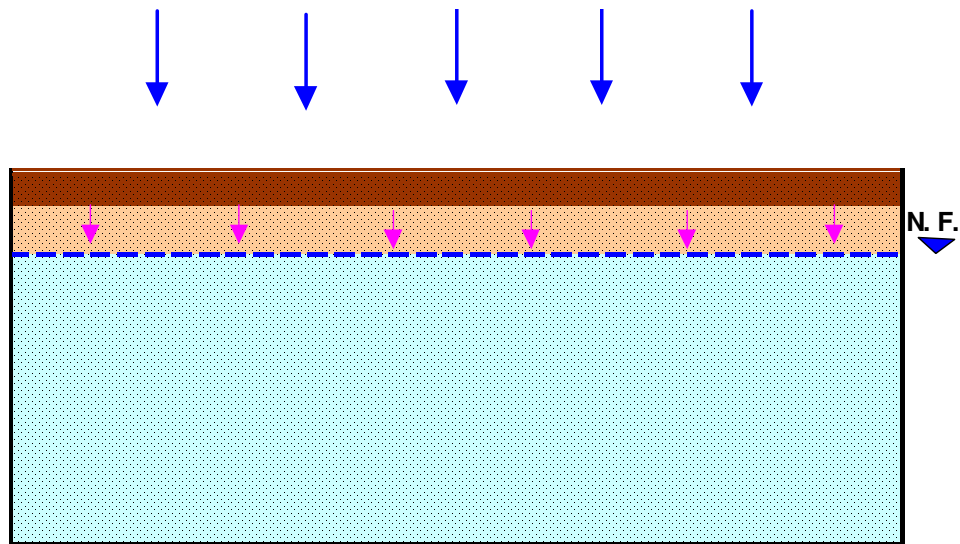
Es lógico predecir que el incremento en el nivel de agua subterránea implica la reducción de la Zona No-saturada (espacio situado entre este y la superficie topográfica) y por consiguiente, de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero a la contaminación, como se describe más adelante, una de las implicancias ambientales del problema.



Pero tal como se anticipara, no son solamente las áreas litorales oceánicas las posiblemente involucradas en los efectos de un cambio climático, traducido en el incremento de las lluvias medias.

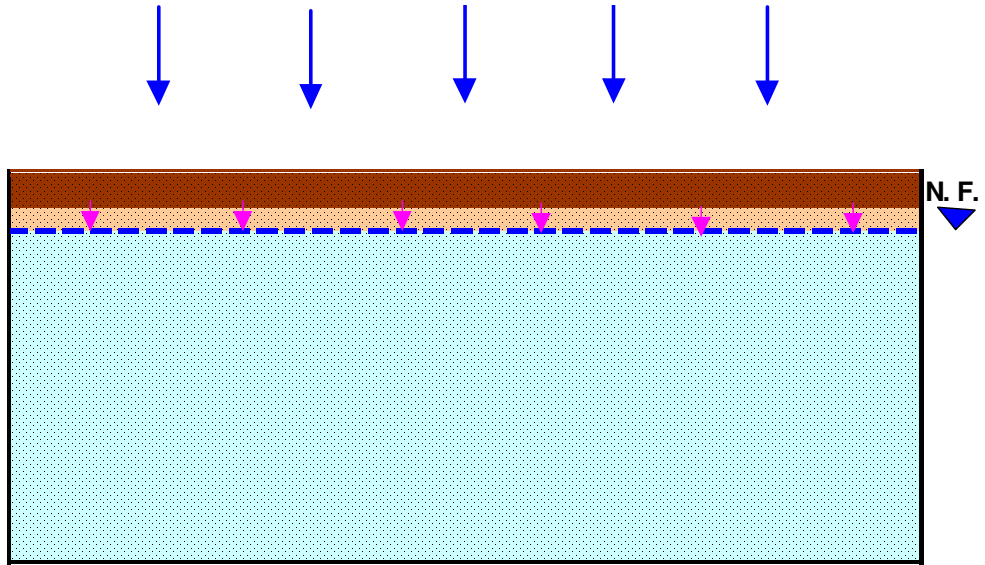
Precisamente en base a lo expuesto en el Capítulo 3, la experiencia de más de treinta años en presencia de un ciclo húmedo ha originado procesos que pueden repetirse ante la instalación de un ciclo pluvioso persistente.

Para el caso de comarcas arreicas o endorreicas, la consecuencia será el derrame, a partir de una posición inicial mostrada en la Figura 2. Se reproduce allí una situación para climas medios o con tendencia a aporte pluviales crecientes, con una Zona No-Saturada poco espesa, suelo próximo a su capacidad de campo y existencia de infiltración



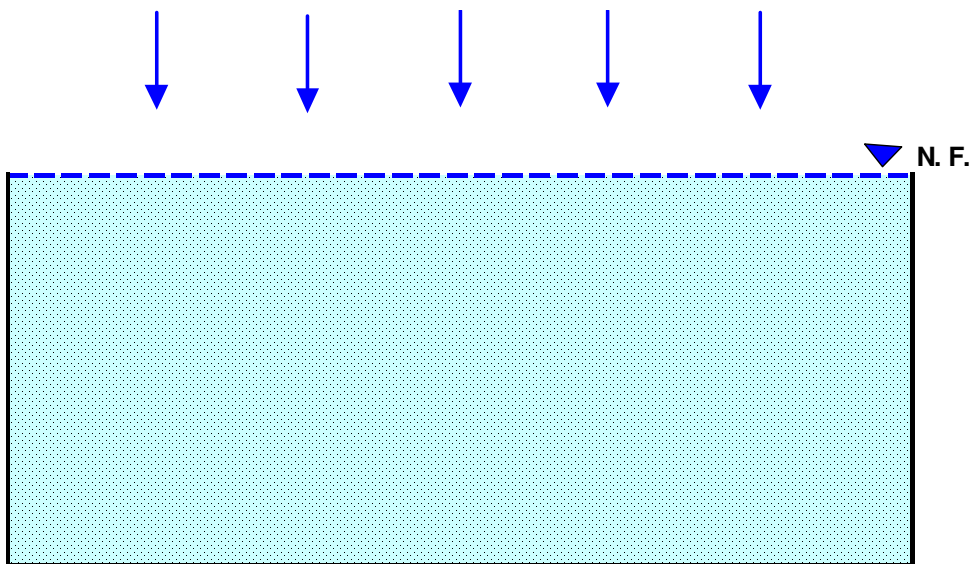
*Figura 2*

En la Figura 3 y al sostenerse el incremento en las lluvias, el suelo alcanza su capacidad de campo, asciende el nivel freático y continúa produciéndose infiltración hacia la zona saturada.



*Figura 3*

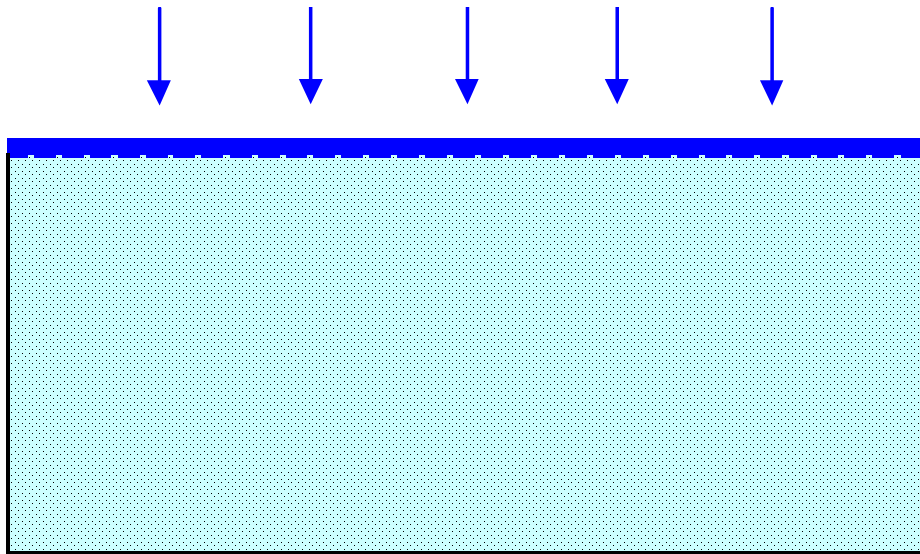
La continuidad de las condiciones excedentarias produce el afloramiento de la superficie freática o de la franja capilar superpuesta (Figura 4). En estas



*Figura 4*

condiciones si prosigue el episodio húmedo ya no ocurre infiltración al hallarse los espacios porales ocupados por agua (saturados), manifestándose el fenómeno de recarga rechazada que como se dijese, implica la imposibilidad de nueva recarga.

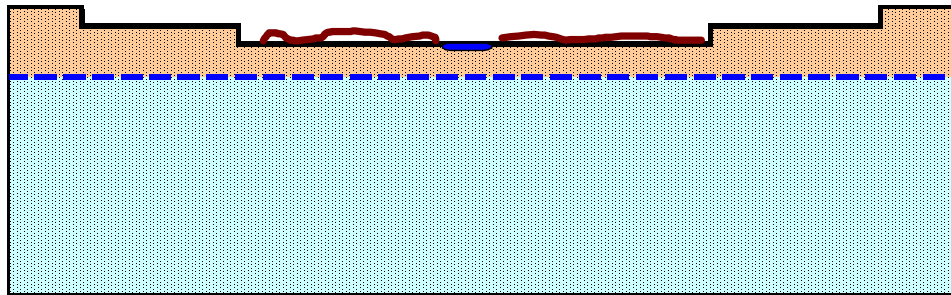
Exhibe la Figura 5 el panorama de la nueva situación para un cambio climático positivo: eliminada la posibilidad de disipación subterránea de la energía aportada por el arco meteórico del ciclo, suceden los derrames o anegamientos que, en el caso de regiones de llanura como la Pampeana bonaerense, van a involucrar extensas superficies con una infraestructura productiva y terciaria necesariamente afectadas.



**Figura 5**

En los sectores exorreicos y a expensas de las características de los valles fluviales en llanura (amplias planicies de inundación), acaecen problemas similares.

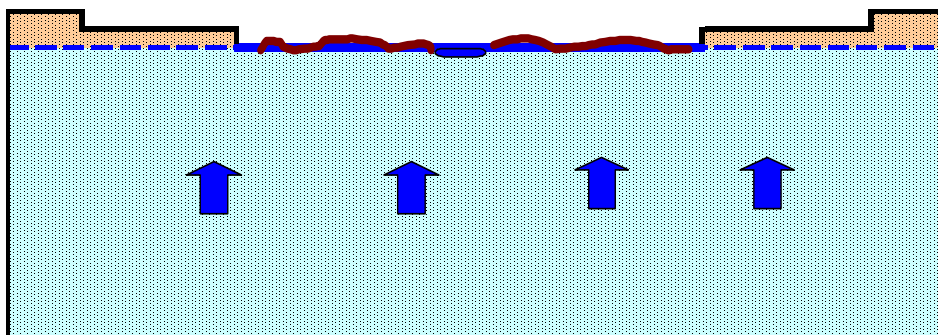
Se representa en la Figura 6 un estadio normal o de situación media (el esquema no permite apreciar que el río es ganador o efluente), donde el plano aluvial no está ocupado por agua e inclusive puede contener geoformas positivas menores.



*Figura 6*

Como en el caso anterior, la instalación de un régimen pluvial más generoso y persistente, origina el ascenso de la superficie freática hasta que la planicie aluvial llega a anegarse (Figura 7).

Nuevos aportes van a colaborar en la exacerbación del fenómeno, ya que el escurrimiento superficial no va engrosar el fluvial, sino a incrementar el volumen de agua contenido en el plano anegado.



*Figura 7*

Además de los inconvenientes devenidos de los sucesos hidrológicos precedentemente planteados, pueden agregarse otros de carácter ambiental no menos importantes.

Como puede apreciarse en las Figuras, existe una progresiva disminución del espesor de la Zona No-Saturada a consecuencia del ascenso freático.

Es precisamente esta zona donde ocurren los principales procesos de atenuación natural de la contaminación exógena (Hernández, 2003). Por tratarse de un sector donde parte de los poros del terreno contienen oxígeno (a diferencia de la zona saturada donde todos están ocupados por agua), tienen lugar fenómenos fisicoquímicos como la oxidación, precipitación-coprecipitación, complejación entre otros, tendientes a reducir la carga contaminante en tránsito. Desde el punto de vista biológico, también se desarrollan procesos de degradación aerobia por la misma razón.

Como la posibilidad de ocurrencia e intensidad de estos sucesos depende directamente del espesor que alcance la ZNS, su disminución transformaría a la comarca donde se presentan los problemas en altamente vulnerable a la contaminación, al tornarse el medio en reductor y anaerobio.

Un ejemplo a mencionar por estar omnipresente en las áreas rurales, es el del saneamiento "in situ" por falta de sistemas de evacuación de excretas domiciliarias. La oportunidad de degradación de la contaminación biogénica (aguas negras) queda reducido prácticamente a cero.

Hasta aquí se han tratado sintéticamente las posibles consecuencias sobre el régimen subterráneo de cambios globales de signo positivo (incremento persistente en las lluvias) y las implicancias intrínseca y extrínsecas que podrían encerrar.

Pero como se anticipara y pese a las tendencias actuales en tal sentido, no todos los cambios serían de ese cariz ni se presentarían en todos los lugares. De instalarse condiciones climáticas de signo negativo, es decir hacia la aridez o semiaridez, serían también preocupantes las secuelas.

En primer lugar, al dificultarse por escasez de agua que el suelo alcance su capacidad de campo, va a disminuir sensiblemente la tasa de infiltración y consecuentemente, profundizarse el nivel freático.

Además de las naturales dificultades para acceder a una captación suficiente, económica y sustentable bajo esas condiciones, es necesario acotar otro tipo de problemas en la región chacopampeana. Es frecuente que la disponibilidad hídrica esté limitada a los recursos subterráneos, yacientes a modo de "lentes" de agua dulce en un marco regional de aguas salobres o salinas (González y Hernández, 1997).

La disminución de los aportes netos pondría en peligro las reservas contenidas en las "lentes" y provocaría intrusión salina, desestabilizando el equilibrio interfacial natural.

Teniendo en cuenta que son muchas las ciudades medianas y pequeñas y localidades rurales afectables directamente, o por utilizar agua importada desde otras que captan dicha fuente, puede asumirse lo severo de las consecuencias. Cabe recordar que las implicancias de las sequías sobre las economías regionales han ido históricamente más allá que las suscitadas por excesos hídricos.

Quizás el incremento en el rol mitigador de la contaminación, a expensas de una mayor potencia de la Zona No-Saturada, pueda ser el único efecto positivo de cambios climáticos depletivos.

A título de síntesis puede rescatarse que, pese a no ser tan aludidos quizás por su menor conocimiento público y carácter "oculto", los recursos hídricos subterráneos serían grandemente alcanzados por los cambios climáticos.

No se trataría solamente de acuíferos costeros, sino de grandes extensiones particularmente en las llanuras, con alto grado de afectación socioeconómica y lenta recuperación ante la hipotética restitución del marco climático original.

También una variabilidad hacia términos de relativa aridez va a incluir efectos negativos de gran importancia, especialmente notables el ambiente de la pampa húmeda-subhúmeda que ha sido sostén tradicional de la economía nacional.

## BIBLIOGRAFIA

- Benavidez, R., O. Canziani, V. Ferreiro, M. A. Hernández y J. Saravia, 1993. "Las inundaciones del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires y el Río Salado. Un aporte para su conocimiento". *Actas Asoc. Arg. Geología Aplicada a la Ingeniería. IAEG-AIGI Edit. ASAGAI*, 7:102-144. Buenos Aires.
- Canziani, O., N. González y M. A. Hernández 1993 "Cambios climáticos seculares como prototipo de cambios globales. Caso ejemplo: El Noroeste bonaerense". *1as. Jornadas Nacionales y 6as. Regionales sobre Medio Ambiente*. Munic. La Plata-Fac. Ciencias Naturales y Museo UNLP. La Plata.
- Coronato, A., O. Martinez y J. Rabassa 2004. "Glaciations in Argentine Patagonia, Southern Southern South America" *Quaternary glaciations: Extent and chronology. Part III South America, Asia, Africa, Australia and Antarctica. Quaternary Book Series, Elsevier*, Amsterdam.
- Gleick, P. H. 1987 "The development and testing of a water balance model for climate impacts assessment". *Water Res. Research*, 23:1049-1061.
- Gleick, P. H. 1989. "Climate change, hydrology and water resources". *Rev. of Geophysics*, 27:329-344.
- González, N. y M. A. Hernández, 1997 "La práctica del riego y el desarrollo sustentable en los acuíferos del Noroeste Bonaerense". *Congreso Internacional sobre Aguas. UBA-AUGM-UNESCO*, 1:55 Buenos Aires.
- Hernández, M. A. 2003 "La importancia de la Zona No-Saturada en la hidrología de llanuras". *Anales Academia Nac. de Cs. Exactas, Físicas y Naturales*. T. 53 (2001):73-82. Buenos Aires.
- Hernández, M.A. y N. González, 1993 "Recursos Hídricos y Ambiente". Elementos de Política Ambiental. *R.Goñi y F.Goin Ed.*, II:175-184. H. Cámara de Diputados de la Pcia. de Buenos Aires. La Plata.
- Hernández, M. A., N. González, M. G. Cabral, J. E. Jiménez y M. Hurtado, 2003. "Importancia de la caracterización física del riesgo hídrico en la llanura húmeda". En *Inundaciones en la Región Pampeana* 9:157-173. *Maiola, Gabellone y Hernández Ed. EDULP* (ISBN 950-34-0246-8). La Plata.
- IPCC, 1990 "Climate change. The IPCC Assessment". W. J. McG. Tegart, G.W. Sheldon and D.C. Griffiths Ed., WMO-UNEP (ISBN 0 644 13497 6). Camberra.
- Klemes, 1985 "Sensitivity of Water Resource Systems to climate variations". WCP Pub. 98, Geneva.
- Maiola, O. y R. Cacivio, 2003 "Planificación y gestión integral de los recursos hídricos: marco organizacional". En *Inundaciones en la Región Pampeana* 7:137-146. *Maiola, Gabellone y Hernández Ed. EDULP* (ISBN 950-34-0246-8). La Plata.

Rabassa, J., A. M. Coronato y M. Salemme 2005 "Chronology of the Late Cenozoic Patagonian glaciations and their correlation with biostratigraphic units of the Pampean region (Argentina)". *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier (en prensa)

Saravia, J., R. Benavidez, O. Canziani, V. Ferreiro y M. A. Hernández 1987. "Lineamientos generales y regionales para un Plan Maestro de Ordenamiento Hídrico del Territorio Bonaerense". Convenio MOSP PBA-MOSP Nación, 313 pp. La Plata (inédito)