

RESPUESTA HIDROGEOMORFOLÓGICA AL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR EN LA BAHÍA DE SAMBOROMBÓN (ARGENTINA)

Braga F¹, Carol EI², Kruse E^{2 (*)}, Pousa J², Rizzetto F¹, Teatini P¹, Tosi L¹

¹ Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Arsenale Tesa 104, Castello 2737/F, 30122 Venezia. Italia

² Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata
Calle 64 n° 3. La Plata. Buenos Aires. Argentina. Teléfono 54-221-4249049
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
kruse@fcnym.unlp.edu.ar

El objetivo de este trabajo es plantear el significado del aumento del nivel del mar en los cambios hidrogeomorfológicos en la Bahía de Samborombón. A partir de información geológica, geomorfológica e hidrológica básica se realizó un análisis morfológico de la planicie costera de la bahía a través de la interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas obtenidas entre 1972 y 2010. El modelo de elevación digital (DEM) se obtuvo de datos de SRTM (USGS/NAS). El análisis de las condiciones actuales y la evolución reciente han mostrado significativos cambios geomorfológicos (áreas de inundaciones, erosión, deposición de sedimentos) que indican la alta sensibilidad de la región frente a modificaciones en las condiciones hidrológicas. La simulación del ascenso del nivel del mar afecta seriamente las marismas y la llanura de marea, reconociéndose los efectos hacia el interior hasta alrededor de 30 km. A su vez tendrá efectos directos sobre la posición de las aguas subterráneas, con especial referencia a la capa freática. En estas condiciones la franja costera permanecerá cubierta por el agua. Hacia el interior se anegarán en forma permanente los sectores bajos, mientras que gran parte del área restante presentará un alto riesgo de inundación

Palabras clave: geomorfología, ascenso del nivel del mar, hidrogeología, Bahía de Samborombón (Argentina)

Introducción

La configuración hidrogeomorfológica y ecológica de las zonas costeras es el resultado de la interacción entre procesos marinos y continentales. La elevación del nivel del mar, tal como ha sido pronosticado por muchos estudios, es uno de los problemas más relevantes que ponen en peligro a las costas.

En las zonas costeras se desarrollan gran parte de los asentamientos urbanos y de las actividades industriales y además presentan un constante crecimiento de la presión humana sobre el ambiente. El aumento de la población mundial y la pérdida de tierras para las actividades económicas obligarán a identificar en el futuro nuevos recursos de tierra y agua, entre los cuales se encuentran pantanos, humedales, llanuras de mareas y estuarios.

Los cambios climáticos y el estrés inducido por las actividades del hombre tales como la contaminación, las obras de ingeniería, obras para el control de inundaciones, canalizaciones, deforestación, urbanización, agricultura y explotación de agua dulce con frecuencia causan degradación y deterioran el hábitat de las zonas costeras.

Se plantea como objetivo del presente estudio entender cómo el aumento del nivel del mar y las intervenciones humanas desencadenan cambios hidrogeomorfológicos en la Bahía de Samborombón. (Fig. 1).

El estuario del Río de la Plata puede considerarse como un área susceptible a cambios ambientales globales, dado que en él se produce la descarga de las aguas de la cuenca más grande de América del Sur (Paraná – del Plata). El sector meridional del Río de la Plata es una región donde la presión sobre la tierra para la producción de alimentos, el desarrollo urbano e industrial puede ser afectada por la influencia del cambio climático en el ciclo hidrológico.

La Bahía de Samborombón se extiende a lo largo de 180 km de costa en el estuario exterior del Río de la Plata. Las fluctuaciones del nivel del mar ocurridas durante el Holoceno y la interacción entre la descarga sedimentaria del Río de la Plata y el transporte litoral originaron una extensa planicie costera (Violante et al. 2001), que actualmente conforma el humedal de la Bahía de Samborombón.

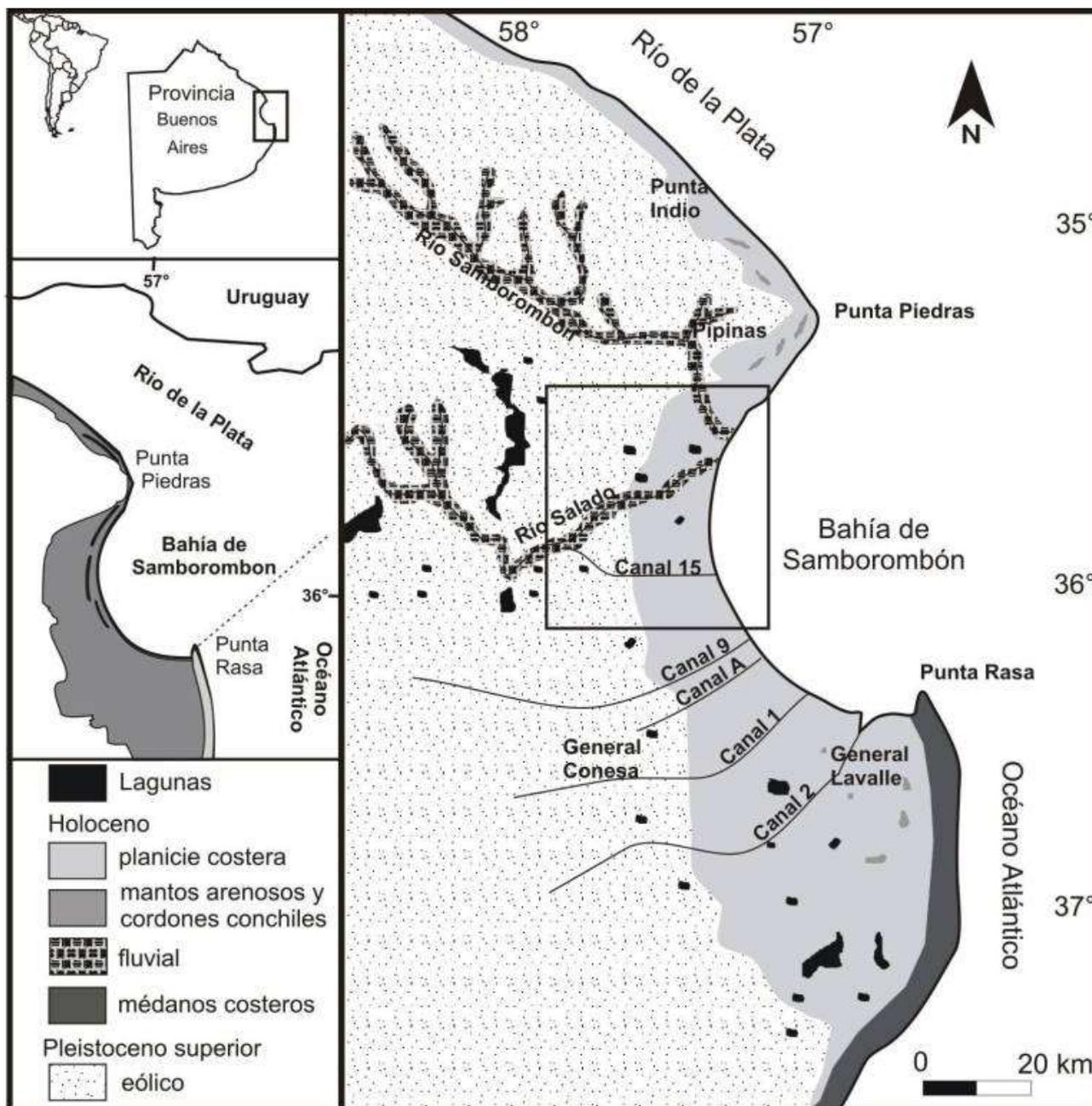


Figura 1: Ubicación y mapa geológico de la Bahía de Samborombón. En la parte central de la figura el recuadro indica el área de estudio de detalle.

Dentro de esta planicie, en el sector central y N del humedal, se reconocen en superficie sedimentos asociados a depósitos fluviales y de cordones conchiles, depositados sobre una antigua planicie costera. Hacia el sector sur, la planicie costera se ensancha, desaparecen progresivamente los depósitos de cordones conchiles y afloran en forma aislada pequeños mantos arenosos (Parker 1979). La base estratigráfica de estos depósitos es una formación pleistocena formada por sedimentos lóessicos.

Estas planicies costeras se caracterizan por su alto valor para la protección de la biodiversidad ya que se trata de una reserva natural Ramsar y por representar áreas favorables para el desarrollo ganadero. Esta región puede verse fuertemente afectada por los períodos de inundaciones, siendo la disponibilidad y calidad del agua dulce (Pousa et al, 2007) uno de los temas más críticos en relación al ambiente y a la sostenibilidad de los recursos naturales.

Materiales y métodos

Se utilizó información geológica, geomorfológica e hidrológica básica de estudios previos en el área de estudio (Carol et al 2009, 2010). En estos trabajos se incluyen los datos de mediciones de niveles freáticos y de agua superficial de una red de monitoreo instalada en los distintos ambientes hidrológicos de la Bahía de Samborombón.

Se realizó un análisis morfológico de la planicie costera en el sector central de la bahía (Fig. 1) a través de la interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas, cuyas fechas de tomas van desde 1972 hasta 2010.

Se analizó la evolución morfológica de un sector de la bahía (Fig. 1). Para ello se utilizaron imágenes satelitales (Landsat MSS, Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM (Path 84 – Row 224) con resoluciones entre 15 y 57 m las cuales fueron adquiridas del U.S. Geological Survey's Earth Resources Observation and Science (EROS) Center (Tabla 1).

Todas las bandas de Landsat fueron utilizadas para el análisis, excepto la banda térmica, que será de utilidad en futuras investigaciones. Las imágenes fueron corregidas con los valores de ganancias y pérdidas en un archivo de metadatos y además corregidas geométricamente mediante el software de procesamiento de imágenes ITT Visualization System's ENVI. Se efectuó la composición de bandas RGB para la interpretación visual de la evolución morfológica regional.

El análisis de detección de los cambios de las zonas afectadas por las inundaciones en la zona continental en septiembre de 2001 se basó en la Spectral Angle Mapper Classification and Change.

Fecha de adquisición Landsat (dd.mm.yy)	Sensor	Resolución espacial (m)	Nº de Bandas
19.11.75	Landsat 2 MSS	57/80	4
24.05.87	Landsat 5 TM	30	7
07.06.01	Landsat 7 ETM+	15/30	8
11.09.01	Landsat 7 ETM+	15/30	8
25.09.09	Landsat 5 TM	30	7

Tabla 1 - Lista de las imágenes utilizadas para el análisis de la evolución morfológica.

El modelo de elevación digital (DEM) de la zona de estudio se obtuvo a partir de datos de SRTM (USGS/NAS.). En particular se utilizaron datos SRTM versión 4 (Reuter et al 2007; Jarvis et al, 2008). Los datos fueron calibrados localmente por comparación con puntos de referencia de los mapas topográficos del Instituto Geográfico Nacional.

Condiciones actuales y evolución reciente del área de estudio

El río Salado (Fig. 1) es el principal curso superficial que descarga en la bahía. Este río drena los excesos hídricos de una amplia zona deprimida caracterizada por un clima templado húmedo (precipitación media anual de 965 mm). La baja pendiente de esta zona (10^{-4}) dificulta su drenaje natural, razón por la cual el Río Salado se encuentra canalizado en varios tramos siendo los principales el Canal Río Salado y el Canal 15.

En relación a la red hidrográfica, la planicie costera ha mostrado significativos cambios geomorfológicos en los últimos 45 años (Fig. 2 y 3). La construcción del canal aliviador del Río Salado en su tramo inferior resulta la modificación más evidente. Este canal artificial, que se extiende en dirección oeste – este, desde Rincón Grande a la Bahía de Samborombón, redujo la longitud del curso inferior del río hasta la desembocadura, y además favoreció y aceleró la descarga de agua y sedimentos fluviales hacia la bahía. Durante los períodos húmedos se observa un aumento en el ancho del canal y la formación de nuevas superficies cubiertas por agua (generalmente en las zonas bajas). En los períodos con escasas precipitaciones es frecuente que los cauces aparezcan secos. (Fig. 2 y 3)

Otros importantes cambios morfológicos tuvieron lugar a lo largo de la costa, y en particular al sur de la antigua desembocadura de Río Salado, donde se observa un desplazamiento de la costa hacia el este. Este avance aumentó en dirección norte-sur a aproximadamente 200 m de la antigua desembocadura de Río Salado y a unos 800 m de la desembocadura del nuevo canal. Por el contrario, al norte de la desembocadura del río Samborombón la costa permaneció relativamente estable desde 1965, tal como se demuestra a

partir de la comparación entre las imágenes satelitales y el mapa topográfico del Instituto Geográfico Nacional (Fig. 2 y 3)



Figura 2. Evolución regional del area de estudio según imágenes satelitales: a) 19.11.1975; b) 24.05.1987; c) 07.06.2001; d) 25.09.2009



Figura 3. Detalles en imágenes satelitales a) 24.05.1987; b) 25.09.2009

Evolución prevista del área costera

Como fue descrito anteriormente, el área de estudio está caracterizada por representar un paisaje de llanura con zonas bajas, en el cual las acciones combinadas de los vientos y las mareas inducen a sobreelevaciones de los niveles de agua que han alcanzado hasta 4,5 msnm (D'Onofrio et al, 2002, Bischoff, 2005).

Se pronostica que durante el siglo XXI, el nivel global promedio del mar presente un aumento más acelerado que en el siglo XX, incluso una conclusión común para todos los modelos de circulación general del acople atmósfera-océano es que el cambio del nivel del mar no es uniforme (IPCC 2007). Nicholls y Cazenave (2010) analizan la evolución del nivel medio global del mar en base a datos observados hasta 2009 y a su proyección hasta 2100 en que se produciría un ascenso en el entorno de 1 m con respecto a la posición actual.

El aumento del nivel del mar produce altos impactos en los ambientes costeros y en la población. Se produce una pérdida de las tierras bajas costeras y un aumento en los daños causados por las inundaciones en las zonas urbanas y las infraestructuras, lo cual se refleja en importantes perjuicios económicos en distintas regiones del mundo. Además de la inundación de las zonas costeras, el aumento del nivel del mar aumenta la vulnerabilidad de estas regiones a las inundaciones causadas por ondas de tormenta, tsunamis y mareas astronómicas extremas.

El estuario del Río de la Plata tiene un régimen micromareal en donde el agua salina proveniente del mar penetra en forma de cuña por debajo del agua dulce del río (Acha et al 2008). La escasa cota del área de planicie (entre 0 y 5 msnm) permite que la onda de marea también se propague hacia el continente inundando la zona de marisma e ingresando a través de los cursos superficiales.

Tal como se indicó el modelo de elevación de terreno de la zona de la Bahía de Samborombón ha sido obtenido de datos SRTM y ajustado con puntos topográficos (Fig. 4a). De acuerdo al DEM la franja costera está formada por la planicie de marea (entre 0 -1 m.s.n.m) y marismas con una elevación que generalmente es menor a 2 m.s.n.m.

La simulación de los cambios de elevación de terreno realizadas considerando 1 m de SLR se muestra en la Fig. 4b. La pérdida de elevación afecta seriamente las marismas y la llanura de marea, reconociéndose los efectos hacia el interior hasta alrededor de 30 km.

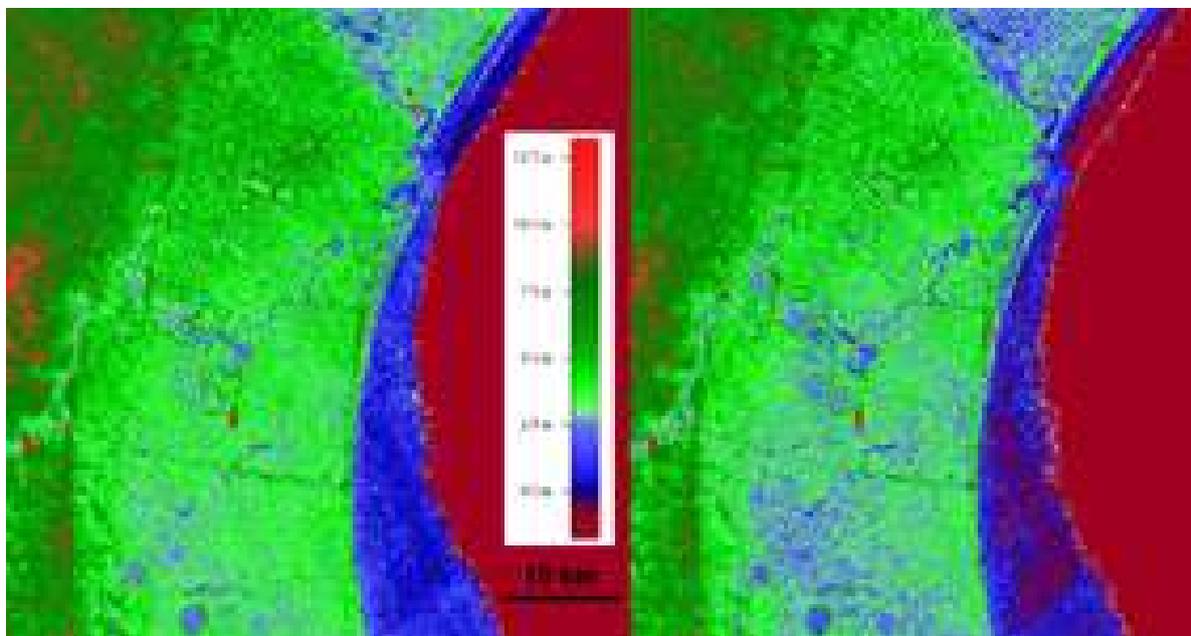


Figura 4.

a) DEM obtenido de datos SRTM; b) simulación de 1 m de SLR de la elevación esperada del terreno

La Fig. 5 muestra dos imágenes satelitales, una correspondiente a una situación hidrológica normal y la otra durante una inundación severa. La diferencia entre la superficie cubierta por el agua en las dos imágenes es

resaltada con color rojo en la Fig. 5c. Las áreas inundadas presentan una buena correspondencia con las áreas más bajas indicadas por el DEM (Fig. 4).

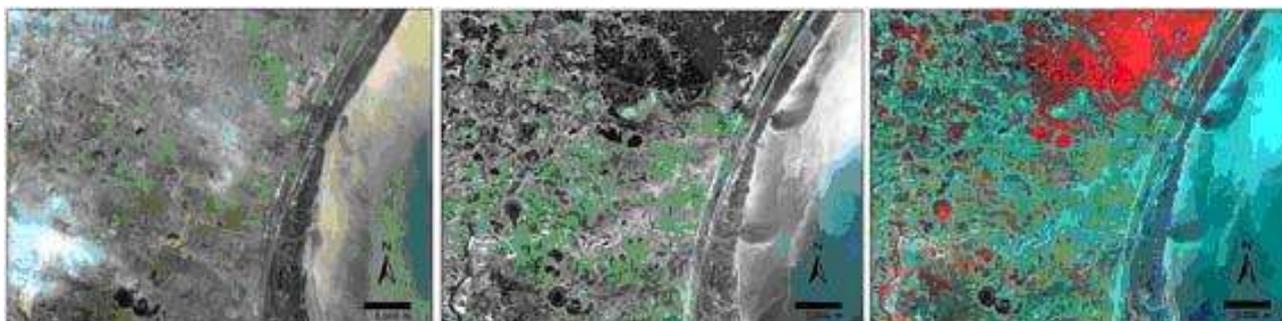


Figura 5. Imágenes satelitales correspondientes a: a) condición hidrológica normal (07.06.2001); b) después de una inundación severa (11.09.2001) (c) diferencias de las condiciones hidrológicas entre el 07.06.2001 y 11.09.2001, escenas resaltadas en color rojo

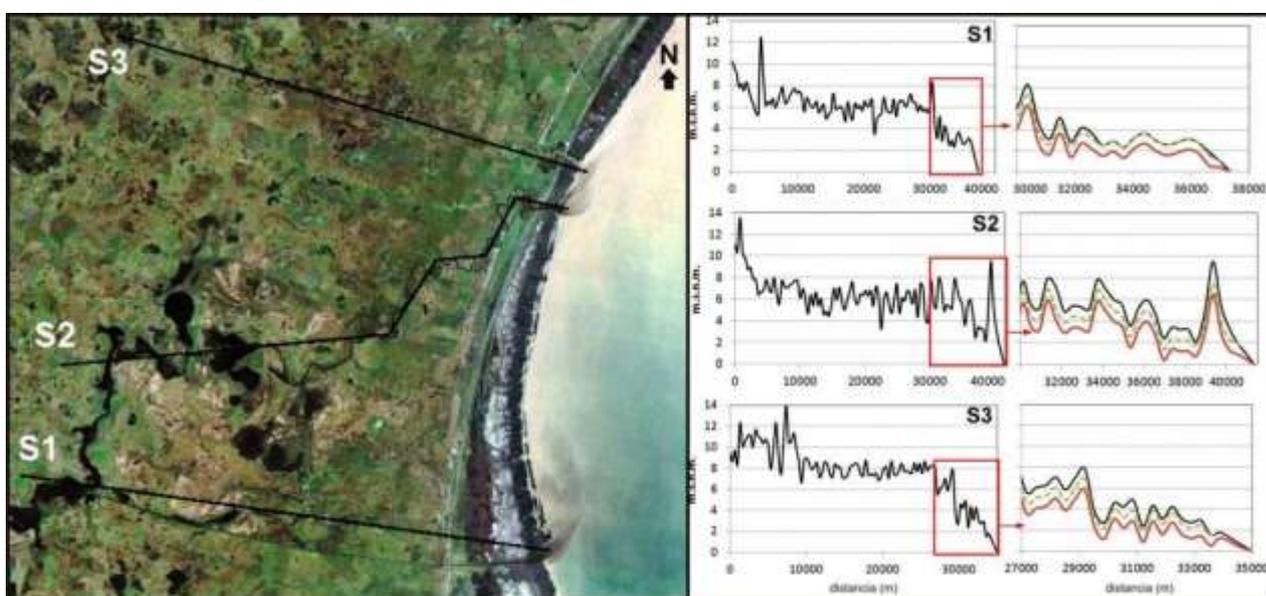


Figura 6. Niveles topográficos (traza negra) obtenidos por de cortes en el SRTM-DEM a través de las trazas S1, S2 y S3 mostradas en el mapa de la izquierda. La traza violeta representa la profundidad promedio del nivel freático. La posición del nivel freático 1m más alto que el actual con respecto al DEM es mostrada por las trazas verdes

En la llanura de marea, que se encuentra actualmente fuera del ciclo mareal, el nivel freático se ubica entre 1,5 y 3 m de profundidad, presentando el flujo subterráneo una descarga regional hacia la bahía y local hacia los sectores deprimidos y cursos superficiales.

Los cordones de conchilla son geformas sobreelevadas (con cotas de 4 a 7.5 m s.n.m.) paralelas a la línea de costa de 50 a 120 m de ancho, con longitudes que alcanzan los 10 km. La profundidad del nivel freático varía entre 1,0 y 3.5 m.b.b.p, siendo el flujo subterráneo desde los sectores más elevados hacia la llanura de marea (oeste) o la marisma adyacente (este).

La marisma es un ambiente de escasa altitud (cota inferior a 1.5 m s.n.m.) que se extiende a lo largo de la línea de costa con un ancho de 15 km en la parte S de la bahía y de 0.5 km en el sector N. El nivel freático aflora o se encuentra muy próximo a la superficie (menos de 0.6 m b.b.p.) y registra oscilaciones periódicas con la marea. Si bien la descarga subterránea es hacia el estuario, la marisma es un área que se inunda diariamente con la pleamar.

El ascenso del nivel del mar tendrá efectos directos sobre la posición de las aguas subterráneas, con especial referencia a la capa freática. Dado que el agua freática descarga o aflora en el agua de superficie, al

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTE

producirse un ascenso de esta última, el sistema tenderá a lograr un nuevo equilibrio para mantener su condición hidrodinámica. Ello fue verificado en distintas áreas experimentales al reconocerse los efectos de las variaciones de marea sobre las aguas subterráneas (Carol et al., 2010). En los perfiles de la Fig. 6 se observa la posición media actual del nivel freático y la posición simulada asumiendo que 1 m de SLR produce un incremento similar en los niveles freáticos. Al producirse el ascenso del nivel del mar, la franja costera permanecerá la mayor parte del tiempo cubierta por el agua y hacia el interior se anegarán en forma permanente muchos de los sectores bajos, que en la actualidad presentan agua sólo en eventos húmedos extraordinarios. Mientras que otros sectores presentarán un alto riesgo de inundación frente a los eventos frecuentes de mayores precipitaciones.

Además debe tenerse en cuenta que en estas condiciones los efectos de las ondas de tormenta, que se asocian con fuertes vientos, cambios en la presión atmosférica y precipitaciones pueden tener un efecto mayor en la inundabilidad periódica del área interior.

A su vez, la modificación que se produciría por el ascenso del nivel del mar en la llanura de mareas y marismas puede modificar la morfología de las márgenes dando lugar a procesos de erosión y redepósito de los sedimentos. Las modificaciones observadas en las imágenes satelitales recientes que fueron descritas indican la alta sensibilidad del área costera a estos fenómenos.

El ascenso del nivel del mar puede generar modificaciones en la calidad química de los cuerpos de aguas superficiales, que se verían afectados por agua de mayor salinidad, lo cual se vincularía especialmente por el ingreso del agua de la marea hacia el interior del continente donde actualmente el agua de los ríos y canales es de menor salinidad. También puede tener influencia sobre las reservas de agua subterránea dulce, que se encuentran almacenadas en cuerpos lenticulares en los cordones conchiles.

Consideraciones finales

La planicie costera que rodea a la Bahía de Samborombón es un ambiente altamente sensible, sujeto a los cambios naturales y a la presión antropogénica. Distintos problemas críticos pueden afectar a esta área de costas, es decir, elevaciones del nivel del mar, inundaciones periódicas, presencia de aguas salinizadas.

El aumento del nivel del mar durante el siglo XX y en la actualidad es un proceso documentado en todo el mundo que está vinculado a los cambios climáticos, principalmente por la fusión de hielos y la consiguiente variación en la masa y el volumen de los océanos. Los impactos de SLR incluyen una importante regresión de la costa, erosión, profundización del nivel del terreno en las proximidades de la costa, inundaciones, intrusión de agua salada, etc.

La interacción entre el agua subterránea y el agua de mar en las zonas costeras tiene sus efectos tanto en la zona costera como mar adentro lo cual incluye a la calidad de los recursos hídricos a través de la intrusión de agua salada en los acuíferos de abastecimiento de agua y el vertido de las aguas subterráneas contaminadas en el mar costero.

La intrusión de agua salada representa una amenaza para la calidad del agua potable, aumenta el riesgo de desertificación de suelo, compromete las prácticas agrícolas y disminuye la capacidad de almacenamiento de agua dulce. En humedales, lagunas y estuarios el intercambio de agua de la superficie con las aguas subterráneas también tiene un fuerte impacto en la flora y fauna. Además, la configuración hidrológica de los entornos de transición se complica por su arquitectura de subsuelo cuaternario.

En la llanura costera en estudio importantes cambios hidrogeomorfológicos se produjeron en las últimas décadas. La construcción de un canal en el curso inferior del río Salado, favoreció el escurrimiento, reduciendo el riesgo de inundaciones, aunque se observaron nuevas áreas anegadas en los períodos húmedos en las proximidades del canal. Asociado a esta canalización se observaron cambios en la erosión y deposición de sedimentos en la desembocadura del Río Salado.

El ascenso del nivel del mar en la Bahía de Samborombón tendrá distintos efectos. La llanura de marea y marismas podrán estar en forma permanente bajo agua y las características ecohidrológicas del humedal costero, que es un sitio de conservación RAMSAR, se verían fuertemente afectadas.

A su vez se generaría un nuevo equilibrio en la relación aguas subterráneas – aguas del estuario y aguas superficiales, lo cual daría lugar a un ascenso de los niveles freáticos en la llanura interior, aumentando el riesgo de inundaciones casi permanente en regiones con una fuerte actividad ganadera.

La sensibilidad del área costera en relación a los procesos de erosión y sedimentación puede producir importantes modificaciones en la morfología de los márgenes de la zona costera.

Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado en el ámbito del Acuerdo de Cooperación Científica entre el CONICET (Argentina) – CNR (Italia), Programa bianual 2011 – 2012 para el proyecto “Agua dulce y saladas en áreas coste-

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTE

ras de alto valor socioeconómico: de la evaluación de la interacción actual con metodologías hidrológicas, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas a la simulación de los efectos previstos del cambio climático”. Las imágenes satelitales son obtenidas del U.S. Geological Survey's Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. Los datos SRTM V4, del USGS/NASA, son del International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).

Referencias

- Acha M., Mianzan H., Guerrero R., Carreto J., Giberto D., Montoya N., Carignan M. 2008. An overview of physical and ecological processes in the Rio de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research* 28, 1579– 1588.
- Bischoff S. (2005). Inundaciones en la línea de costa. En: Fundación Torcuato Di Tella, Argentina: 2ª Comunicación de cambio climático. Vulnerabilidad de la Zona Costera. Informe final. 392 pp
- Carol, E., Kruse, E. and Mas Pla, J. 2009. Hydrochemical and isotopical evidence of ground water salinization processes on the coastal plain of Samborombón Bay, Argentina. *Journal of Hydrology*, 365: 335-345.
- Carol, E., Kruse, E., and Roig, A. 2010. Groundwater travel time in the freshwater lenses of Samborombón Bay, Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 55: 5, 754 – 762.
- D'Onofrio Enrique, Fiore Mónica, Valladares Javier, 2002: Ciencia Hoy. Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Asociación ciencia Hoy. Vol. 12. N° 67: 38-45
- IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon et al., Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2007).
- Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2008, Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Nicholls, R y Cazenave, A. 2010. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science* 328, 1517 (2010); DOI: 10.1126
- Parker, G., 1979. Geología de la planicie costera entre Pinamar y Mar de Ajó, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 34, 167–183.
- Pousa, J., Tosi, L., Kruse, E., Guaraglia, D., Bonardi, M., Mazzoldi, A., Rizzetto, F., Schnack, E., 2007, Coastal processes and environmental hazards: The Buenos Aires (Argentina) and Venetian (Italy) littorals, *Environmental Geology* 51, 1307–1316.
- Reuter H.I, A. Nelson, A. Jarvis, 2007, An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data, *International Journal of Geographic Information Science*, 21:9, 983-1008.
- Violante, R., Parker, G., Cavallotto, J., 2001. Evolución de las llanuras costeras del este bonaerense entre la bahía de Samborombón y la laguna de Mar Chiquita durante el Holoceno. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56, 51–66.