

Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de Río Negro

Roberto R. KOKOT^{1,2}, Jorge O. CODIGNOTTO^{1,2} y Manuela ELISSONDO¹

¹ Departamento de Ciencias Geológicas, FCEyN, UBA. Pab. 2 Ciudad Universitaria C1428EHA Buenos Aires, Argentina.

² CONICET. E-mail: rkokot@gl.fcen.uba.ar

RESUMEN. Los escenarios elaborados a escala mundial por el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC) respecto al ascenso del nivel del mar, debido principalmente a la expansión térmica del océano y a las pérdidas de masa de los glaciares, prevén valores que en promedio oscilan entre 0,09 y 0,88 m desde 1990 al 2100, con tendencia a la aceleración. Los impactos potenciales por la elevación del mar conducen a cambios en el área costera, que incluyen inundación, incremento en el retroceso costero, e intrusión salina en los acuíferos y estuarios. Con el objeto de posibilitar un adecuado manejo de la costa de la provincia de Río Negro, se efectuó una zonificación que permite disponer de información referente a la vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar, a través de un mapa de simple lectura. Las áreas de peligrosidad geológica, referidas a inundación permanente y/o episódica se identificaron mediante índices de vulnerabilidad costera, también denominados índices de susceptibilidad, obtenidos a través de la aplicación de un algoritmo que relaciona variables obtenidas a partir de información geológica costera, oceanográfica y climatológica. Las zonas más vulnerables al ascenso del nivel del mar, corresponden a Balneario El Salado (Playas Doradas), San Antonio Oeste – San Antonio Este, Caleta de los Loros y la desembocadura del río Negro, mientras que el tramo de costa correspondiente a la costa acantilada ubicada al oeste del río Negro y al sur de punta Pórfido, muestra una vulnerabilidad baja.

Palabras clave: *Ascenso del nivel del mar. Vulnerabilidad. Cambio Climático. Geomorfología*

ABSTRACT. *Vulnerability to sea-level rise of the coast of the Río Negro province.* According to the global predictions by the International Panel of Climate Change (IPCC), the sea-level rise due to ocean thermal expansion and glacier mass loss will average 0.09 – 0.88 m between 1990 and 2100, with a trend toward an increasing rise rate. Potential impacts of this increasing rise rate relate to changes in the coastal area, including floods, increased coastal retreat, and saline intrusion in the coastal aquiferous and estuaries. In order to achieve an appropriate coastal management scheme in the Province of Río Negro, the area was divided into zones to show information of the level of hazard on a simple map. To identify areas of geological hazard related to permanent and/or episodic floods, a database was prepared. The threatened or in-danger areas were identified by means of coastal vulnerability indices, also called susceptibility indices, which were calculated by means of an algorithm that relates different variables obtained from coastal geology, and oceanographic and climatological information. This index is defined by seven variables and can be used to identify areas in risk of erosion or permanent/temporary flood. The most vulnerable areas to sea level rise are Balneario El Salado (Playas Doradas), San Antonio Oeste - San Antonio Este, Caleta de los Loros, and the Río Negro mouth. By contrast, vulnerability of the coastal area located to the south of Punta Pórfido is low.

Key words: *Sea level change, Coastal erosion, Climatic Change, Coastal hazard, Geomorphology*

Introducción

Hace unos 18.000 años la temperatura media global del aire en superficie era de unos 5 a 10°C más baja que la actual. Las bajas temperaturas facilitaron el crecimiento de glaciares, a expensas de un descenso del nivel del mar de unos 120 m respecto del nivel presente. Los cambios climáticos condujeron a fluctuaciones de corto o largo término que afectan las áreas costeras y actualmente se registran tendencias en el ascenso del nivel del mar. Estas variaciones están acompañadas por cambios en la temperatura del aire que pueden afectar las intensidades y frecuencias de las tormentas, produciendo el aumento de la erosión costera, cuyos efectos pueden conducir a la pérdida de vidas y propiedades.

El cambio climático, especialmente el causado por un incremento en la temperatura media global de la superficie del mar, puede producir que la actual tendencia al ascenso del nivel del mar aumente significativamente (IPCC 2001). El calentamiento climático por efecto invernadero, producido por el aumento de CO₂ y otros gases, conducirían a un incremento en el nivel del mar por el efecto combinado de la expansión térmica de los océanos y la licuación de los glaciares de montaña y calotas glaciarias.

Los impactos potenciales de la aceleración en la elevación del mar incluyen inundación, incremento en el retroceso costero, e intrusión salina en los acuíferos costeros y estuarios. En relación con ello, Parry *et al.* (2001) presentan predicciones respecto al aumento en millones de personas que se verían afectadas por los riesgos de ham-

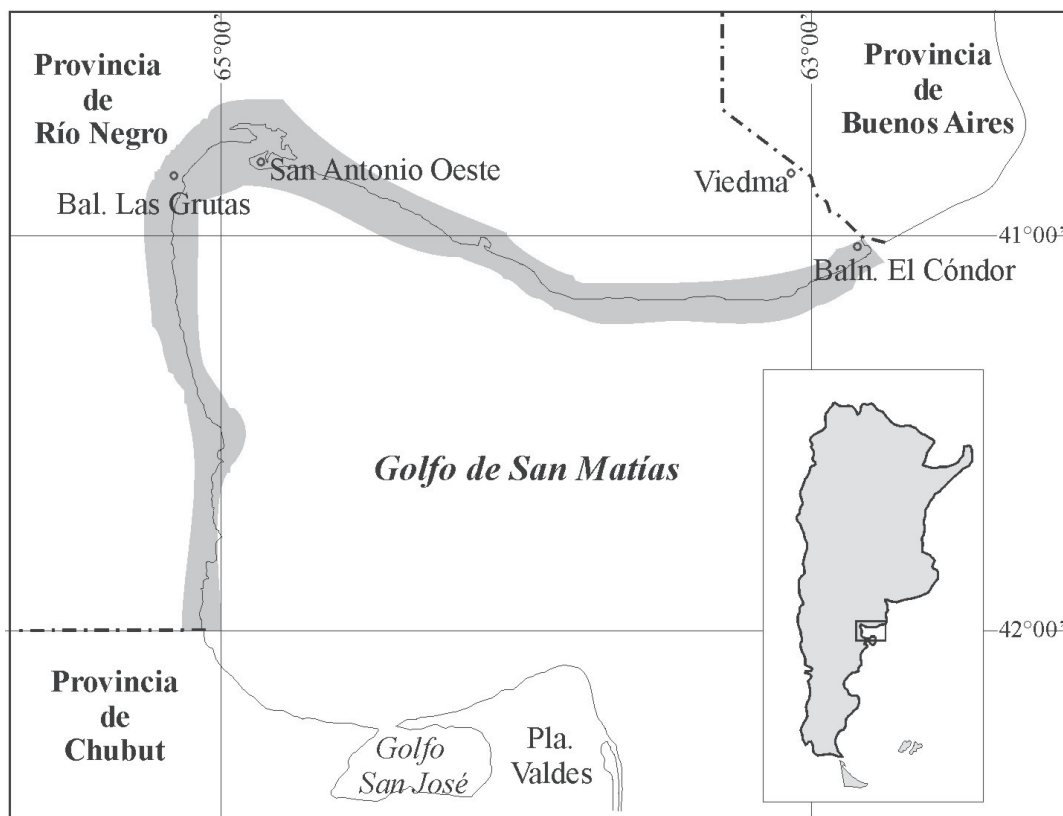


Figura 1: Mapa de ubicación.

bre, falta de agua, y exposición a la transmisión de enfermedades.

En respuesta a este ascenso del nivel del mar hay varias opciones, entre ellas: protección de la línea de costa a través de diques, relleno de playas, protección sólo de las áreas densamente pobladas, abandono del desarrollo de la actual línea de costa y retroceso tierra adentro. Para poder evaluar la opción más apropiada deben ser identificadas áreas amenazadas, usando información del pasado y del presente de la costa.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expresado, se estudió el área costera de la provincia de Río Negro (Fig. 1) y se elaboró una base de datos que contiene variables con información geológica costera, oceanográfica y climatológica. A través de un algoritmo que las relaciona, se calcularon los índices de vulnerabilidad costera (Gornitz 1990 y Gornitz *et al.* 1994, 1997), también denominados índices de susceptibilidad (Shaw *et al.* 1998). A partir de los mismos, se determinaron áreas amenazadas o en peligro, identificadas como zonas más o menos vulnerables.

Términos tales como vulnerabilidad y riesgo suelen usarse con cierta imprecisión y debido a ello, UNESCO en UNDR0 (1979) define:

Amenaza, peligro o peligrosidad (*hazard*): Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.

Vulnerabilidad (*vulnerability*): Es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resulta-

do de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.

Riesgo (*risk*): Es el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desastre.

Finkl (1994) define la peligrosidad como un proceso indeseable sin considerar los efectos negativos o daños que pueda producir y, riesgo en general, se usa cuando hay un costo involucrado, ya sea en propiedades o vidas humanas.

El término vulnerabilidad no es usado tal como lo usa Cendrero (1987) que considera a la vulnerabilidad como un atributo donde se incluyen los aspectos poblacionales, organización social, economía, programación, valores culturales, etc, sino que el elemento vulnerable ante un posible ascenso del nivel del mar tal como lo usa Gornitz (1990), en este caso lo constituye la costa de la provincia de Río Negro.

Metodología

El método utilizado exige la incorporación de datos geológicos y oceanográficos que deben ser llevados a valores numéricos. Los mismos resultan de muestreos, observaciones directas y también de información bibliográfica. Cabe señalar que el método admite la incorpora-

ción de nuevos datos, permitiendo de así desearlo, la reformulación a través de un nuevo modelo.

Componentes de la base de datos

- Elevación media del territorio: representada por valores de altitud e indicadora de peligro de inundación.

- Subsistencia local: Muestra las variaciones relativas del nivel del mar en el área de estudio. También indica peligro de inundación.

- Geología (litología y características estructurales) que representa la resistencia a la erosión de los afloramientos del área costera.

- Geomorfología: Permite prever la evolución del paisaje, posible degradación a partir de inundación y erosión y condiciones energéticas.

- Desplazamiento de la línea de costa: Dato que representa el comportamiento histórico de la línea de costa y su tendencia evolutiva respecto a la componente horizontal.

- Altura máxima de ola: Representa la energía del medio marino y su capacidad erosiva.

- Rango de mareas: Junto con los episodios de tormenta permite identificar las variaciones episódicas del nivel del mar. Se relaciona tanto a inundación como al riesgo de erosión.

Índice de vulnerabilidad costera

El cálculo del índice de vulnerabilidad se efectuó siguiendo el criterio de Gornitz (1990), donde la obtención de un valor numérico se realiza a través de algoritmos que conjugan de manera distinta las variables mencionadas. El objetivo es la obtención de un índice que refleje la real vulnerabilidad y que esta no sea valorada con exageración por un inadecuado balanceo de las variables involucradas.

En función de ese criterio se tiene

$$V = \sqrt{\frac{(a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5 \cdot a_6 \cdot a_7)}{7}}$$

(Gornitz *et al.* 1990), donde:

a_1 = elevación media

a_2 = tendencia en la subsistencia local

a_3 = geología

a_4 = geomorfología

a_5 = desplazamiento medio de la línea de costa

a_6 = altura máxima de ola

a_7 = media del rango de mareas

En el cuadro 1, se indican los valores que permiten dar un tratamiento numérico a la ecuación. Se optó por un rango de de 1 a 5, de muy baja a muy alta vulnerabilidad.

Para aplicar el método, se efectuó la zonificación del área costera sobre la base de mapas topográficos 1:250.000 del IGM, que poseen una cuadrícula de 10 km de lado realizada según coordenadas Gauss-Krügger. Así quedaron determinadas 43 celdas sobre la línea de costa,

donde a cada una de ellas se le adjudicó un valor, en función de las siete variables indicadas en el cuadro 1. Las tareas comprendieron la digitalización de la línea de costa entre el río Negro al norte y el paralelo S 42° en las proximidades de Puerto Lobos, límite con la provincia del Chubut.

Evaluación de los componentes de la base de datos

Valores de altitud representados por mapas topográficos

Los datos topográficos del área costera y zonas de influencia se obtuvieron de los mapas 1:250.000 del IGM: Viedma, General Conesa, San Antonio Oeste y Sierra Grande, cuyas equidistancias son de 50 metros. Las coordenadas de referencia son Gauss-Krügger. Debido a la poca definición de datos altimétricos de estos mapas, se obtuvieron valores in situ sobre diferentes ubicaciones de la costa, midiendo altura de acantilados y altura de las localidades a través de perfiles topográficos expeditivos.

Respecto a la altimetría, pueden diferenciarse dos zonas, las zonas acantiladas y las no acantiladas con escaso relieve respecto al nivel medio del mar. Las zonas bajas posibilitarán la inundación directa ante el aumento del nivel del mar. Las poblaciones costeras ubicadas en zonas bajas: son Balneario el Condor, San Antonio Oeste y Balneario El Salado, próximo a Sierra Grande.

Subsistencia local

La posición del mar es función de cambios reales en el nivel del mar (eustasia) y de cambios en el nivel de la corteza terrestre (tectonismo e isostasia). Todas las mediciones corresponden a un nivel relativo del mar, y como ninguna región del mundo puede ser considerada absolutamente estable, todas las curvas de variación del nivel del mar deben ser consideradas como relativas hasta que las componentes eustáticas y de la corteza puedan ser separadas.

El término eustasia fue introducido para designar los cambios del nivel del océano en oposición a los cambios del nivel de la corteza. Se pensaba que el nivel del mar no podría cambiar sino como consecuencia de las variaciones de volumen del agua de mar (glacio-eustasia) o por consecuencia de las variaciones de volumen de las cuencas oceánicas (tectono-eustasia). Al concluir que esos cambios tenían una repercusión mundial, la eustasia fue originalmente definida como cambio mundial del nivel del mar (Fairbridge 1961). Con una introducción de la idea de cambio de superficie del geoide (geoide-eustasia), el término debe ser redefinido simplemente como cambio del nivel del mar (Mörner 1976).

Codignotto *et al.* (1992) al estudiar las posiciones del nivel del mar durante el Holoceno en la costa argentina determinaron que el máximo nivel debido a la transgresión marina fue alcanzado entre los 4000 y 6500 años AP. Estos

Cuadro 1: Rango de los componentes del índice de vulnerabilidad costera

	RANGO DE LAS VARIABLES DE VULNERABILIDAD COSTERA				
	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
VARIABLES	1	2	3	4	5
1. Altitud (m)	>30	21-30	11-20	6 - 10	0 - 5
2. Cambio del nivel del mar (mm/año)	< -1,0	-1,0 a 0	0,1 a +2,0	2,1 a 40	>4,0
3. Tipo de roca (geología)	Rocas plutónicas, volcánicas y metamórficas de alto grado	Rocas metamórficas de bajo grado	Mayoría de las rocas sedimentarias	Rocas sedimentarias poco consolidadas.	Sedimentos inconsolidados
4. Geoforma (geomorfología)	Fiordos, acantilados altos	Acantilados intermedios y bajos	Barreras, deltas, espigas tómbolos	Playa, y playa sobre plataforma litoral	Planicies de marea, marismas
5. Desplazam. de la línea de costa (m/a)	>+0,1 acreción	0 estable	-0,1 a -0,5 erosión	-0,6 a -1,0 erosión	< -1,0 erosión
6. Máxima altura de ola en un año (m)	0 - 2,9	3,0 - 4,9	5,0 - 5,9	6,0 - 6,9	>6,9
7. Rango de marea (m)	<0,50	0,5 - 1,9	2,0 - 4,0	4,1 - 6,0	>6,0

*Modificado de Gornitz (1990).

autores reconstruyen la velocidad de descenso del mar a partir de ese momento y observan que tiene un comportamiento diferencial en toda la costa. Los valores obtenidos indican una media aritmética de 9,1 mm/año. Los datos de la provincia de Río Negro obtenidos a partir de localidades cercanas indican una velocidad de descenso del nivel del mar de 7,8 mm/año para Puerto Lobos (provincia del Chubut) y de 13,6 mm/año para la desembocadura del río Negro. Si se filtran los datos a partir del valor medio, que se podría aproximar a la componente eustática, resulta que la boca del río Negro presentó una componente tectónica positiva (opuesta al descenso del nivel del mar) y la zona de Puerto Lobos, próxima a la cuenca de Valdés, tiene un comportamiento tectónico negativo (acompañó el descenso del nivel del mar, pero con velocidad inferior).

Variaciones del nivel del mar

El aumento global del nivel del mar es sensible a variaciones climáticas de largo término. El calentamiento global probablemente causará el aumento del nivel del mar por:

1. Expansión térmica de los océanos

2. Ablación de los glaciares de montaña y pequeñas calotas de hielo.

3. Ablación acentuada de las calotas antártica y de Groenlandia.

Proyecciones del futuro aumento del nivel del mar dan rangos de entre 0,15 m a 1,50 m con una mejor estimación de 0,48 m para el año 2100, Warrick y Oerlemans (1990). Según Gornitz *et al.* (1994) el valor a considerar para la tendencia global de ascenso del nivel del mar se halla entre 1,0–2,0 mm/año tomando como línea de base para la tendencia eustática el valor de 1,5 mm/año.

Hace unos 250 años aproximadamente el nivel del mar comenzó a ascender imperceptiblemente, haciéndose notable en el presente. Actualmente, se prevé en promedio un ascenso de 0,09 a 0,88 m entre 1990 y 2100, según la máxima amplitud de SRES (Special Reports on Emission Scenarios). Esto es debido en primer lugar a la expansión térmica del océano y a las pérdidas de las masas de los glaciares. Fundamentalmente se toma el escenario A2 del IPCC (2001) donde el rango de ascenso es de 0,10 m para el año 2040, 0,25 m para el año 2080 y 0,40 m para el año 2100. Este rango es similar a las proyecciones dadas por el IPCC, *Second Assessment Report (SAR)*, con valores entre 0,13 a 0,94m.

Una estimación de Nicholls *et al.* (1999), sugiere que en la década del 2080, el ascenso del nivel del mar causará una pérdida de más del 22% de los humedales del mundo, aunque habrá significativas variaciones regionales. Dicha pérdida se refuerza con otras tendencias adversas como la acción humana estimada por DETR (1999), en alrededor del 40% comparando los valores de 1990 con lo proyectado hacia el 2080. Los escenarios estabilizados desarrollados por DETR (1999), muestran una gran reducción en pérdidas de humedales, de 6 a 7%, comparados con el 13%, correspondiente a los no mitigados.

El ascenso del nivel del mar se ha estimado en 1-2 mm/año durante la pasada centuria, IPCC 2001 (TAR WGI capítulo 11) y nuevos trabajos científicos anticipan que esta relación se acelerará durante las próximas décadas IPCC (2001).

En resumen en los últimos 3000 años el mar ascendió un promedio de 0,1-0,2 mm/año, y desde 1900 entre 1 y 2 mm/año. Para la costa argentina, pueden tomarse datos del mareógrafo de Buenos Aires, con valores entre 1905 y 1987, que dan una tendencia al ascenso del nivel del mar de 1,6 mm/año ($r^2 = 0,4$) (Dennis *et al.* 1995). Este valor es estadísticamente significativo con un 95% de confiabilidad. Los datos disponibles muestran que en el año 1995 los valores de ascenso del nivel del mar local coincidían aproximadamente con las tendencias globales. Los datos del Puerto Quequén indican un ascenso del nivel del mar de 0,8 mm/año ($r^2=0,2$). Lanfredi *et al.* (1988) obtuvieron para este mismo lugar un ascenso de 1,8 mm/año.

De acuerdo al cuadro 1 y con las tendencias previamente señaladas que indican un comportamiento diferencial en la provincia de Río Negro, se eligió un rango de ascenso moderado (0,1 – 2,0 mm/año).

Geología

Se describe la geología del área con énfasis en las características litológicas de los afloramientos, debido a que las condiciones geotécnicas de los mismos representan la fuerza de resistencia a la erosión ante la incidencia de olas y corrientes.

Los datos fueron obtenidos de las hojas geológicas San Antonio Oeste de Martínez *et al.* (1998) y Sierra Grande (Busteros *et al.* 1998), publicaciones previas y datos propios a través de relevamientos del área de trabajo. A cada tipo de afloramiento se le adjudicó un valor de resistencia a la erosión. Estos valores fueron obtenidos a través de comparación con una escala previamente definida por Kokot (1999) para la costa argentina y adaptada a un rango de 1 a 5. En el cuadro 1 se muestran los valores adjudicados según tipo de afloramiento.

Descripción de los afloramientos costeros

Se describen desde la desembocadura del río Negro hacia el oeste, hasta San Antonio Oeste, y desde allí hacia el sur hasta el paralelo 42°S, límite con la provincia de

Chubut. En la desembocadura del río Negro, y sobre su margen derecha, se halla una acumulación de sedimentos arcillo arenosos correspondientes a depósitos de planicies de marea, interpuestos entre gravas y arenas de la terraza fluvial más baja del mismo. El área costera tiene una amplia zona de acumulación constituida por depósitos de cordones litorales gravoarenosos y arenosos.

Hacia el oeste aflora la Formación Río Negro (Andreis 1965), formada por alternancia de bancos de areniscas grises azuladas, de grano fino a mediano, con estratificación laminar a entrecruzada y pelitas limosas con estratificación fina de colores, gris, castaño claro y rosado. Presenta intercalaciones de yeso y cerca de la desembocadura del río Negro la base está integrada por sedimentitas marinas. El límite superior, marcado por una discordancia erosiva está en contacto con pefitas correspondientes a los rodados patagónicos o con depósitos arenosos de médanos. Los afloramientos se hallan expuestos en los acantilados y en la plataforma litoral. También afloran en el área sedimentitas marinas que Del Río y Martínez (1998) indican como correspondientes a la Formación Puerto Madryn (Haller 1978), niveles que fueron denominados Facies Balneario La Lobería por Angulo y Casamiquela (1982) y que se intercalan en la base de la Formación Río Negro (Andreis 1965) allí aflorante.

En la bahía Rosas afloran depósitos de cordones litorales, y en la proximidad de la caleta de Los Loros depósitos de cordones litorales y dunas. Al oeste de la punta Mejillón, aflora la Formación Barranca Final (Kaasschieter 1965), constituida por arcillitas y arcillitas arenosas de color gris, con intercalaciones tobáceas. Hacia el oeste aflora la Formación Baliza San Matías (Angulo *et al.* 1978) constituida por conglomerados con matriz arenosa, con clastos de rodados y valvas de pelecípocos con estratificación gruesa. Los rodados varían de 5 a 15 cm y el cemento es calcáreo de color castaño amarillento a castaño oscuro.

Hacia el oeste se encuentra la espiga de punta Villarino, área formada por depósitos de cordones litorales compuestos por arena mediana y gravas. Hacia el oeste, la espiga de punta Delgado, también constituida por depósitos de cordones litorales gravoarenosos con porcentaje variable de conchillas. Angulo *et al.* (1978) denominan a estos depósitos Formación San Antonio. Entre ambas espigas, el área costera de la bahía de San Antonio está compuesta por depósitos de planicie de mareas constituida principalmente por arcillas. Hacia el norte, fuera de la planicie de mareas actual se hallan depósitos de cordones litorales, estudiados por Fidalgo y Porro (1981). Feruglio (1950) describió la terraza de San Antonio Oeste indicando que tiene forma de lengua y está ubicada en la zona norte del golfo San Matías. La faja costera está cubierta por depósitos de dunas móviles de hasta 10 m de altura. A unos 10 km al SO los depósitos marinos yacen sobre una superficie de erosión labrada en rocas del Terciario. Estos depósitos están compuestos por arena, grava y cascajo de rocas principalmente porfíricas, a veces cementados por carbonato de calcio. Poseen una abundante fauna de bivalvos y la altitud de la terraza se halla entre 10 y 12

metros. Según Feruglio (1950) todas las especies pertenecen a formas que viven en el mar adyacente, que por ello y por la baja posición altimétrica fue asignada al Holoceno.

En las inmediaciones de Balneario Las Grutas afloran sedimentitas de la Formación Gran Bajo del Gualicho (Lizuain y Sepúlveda 1978), formadas por arcillitas, arcillitas arenomargosas, calcoarenosas y areniscas coquinoideas, arcillosas y calcáreas. También presentan yeso y material tobáceo. Cabe aclarar que estos afloramientos han sido denominados de muchas maneras y una revisión del tema puede hallarse en Martínez *et al.* (1998).

Gran parte de los afloramientos costeros están cubiertos por depósitos eólicos y depósitos coluviales constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas no consolidados.

Al sur de Las Grutas afloran granitos de grano fino y mediano de colores rosado y gris pertenecientes al Complejo Plutónico Pailemán (Giacosa 1993) y semicubiertos por arenas de playa. En parte son cubiertos por la alta marea y Sato *et al.* (1998) mencionan estos afloramientos como correspondientes al basamento ígneo–metamórfico. Estos afloramientos constituidos por granitos rojizos de grano fino se hallan en el balneario Piedras Coloradas y en las bajadas a la playa conocidas como El Tanque y El Buque, son denominados Leucogranitos de Las Grutas por Varela *et al.* (1997).

Al norte del paralelo 41°S y hasta la punta Colorada, aflora en forma discontinua la Formación El Fuerte (Kaasschieter 1965), que consiste en calizas arenosas, de color blanco grisáceo, en sectores conglomerádicas, portadoras de algas y briozoos. En parte son areniscas carbonáticas, muy cementadas que presentan una alta resistencia a la erosión y constituyen la extensa plataforma litoral, en parte cubierta por depósitos de cordones litorales

Los cordones litorales afloran sobre esta plataforma y en forma discontinua hasta el límite con la provincia de Chubut. Son depósitos pleistocenos y holocenos, en general gravas arenosas con presencia de bivalvos, en algunos casos en posición de vida y en otros con evidencia de transporte litoral.

En el área ubicada próxima a la desembocadura del arroyo Verde se hallan depósitos de cordones litorales engolfados entre afloramientos de volcanitas de la Formación Marifil (Malvicini y LLambías 1974). Estos depósitos fueron estudiados por Feruglio (1950) y Bayarsky y Codignotto (1982) en la costa de la provincia de Chubut.

En la punta Sierra y al nordeste, en islotes próximos a la ribera, afloran granitos de la Formación Punta Sierra (Weber 1983). Estos afloramientos están constituidos por granitos biotítico-moscovíticos de colores grises rosados, a veces de tonos parduzcos donde el grano varía de fino a grueso. También afloran granitos en la desembocadura del Arroyo Salado, adjudicados al Plutón El Salado (Busteros *et al.* 1998).

En la punta Colorada, punta Pórfido y hasta el paralelo 42°S, en parte cubierta por cordones litorales, depósitos coluviales y eólicos afloran rocas de la Formación Marifil, correspondiente a un conjunto de volcanitas, descriptas

por Malvicini y LLambías (1974) como parte de un plateau ignimbrítico.

Al norte y sur de la punta Colorada, afloran sedimentitas marinas con gran aporte piroclástico de la Formación Gaiman (Haller y Mendía, 1980). Compuesta por capas horizontales a subhorizontales de tobas arcillosas y areniscas.

Al sur de la punta Pórfido, en contacto con lavas riolíticas de la Formación Marifil asoma un afloramiento de esquistos cuarcíticos y pizarras de la Formación El Jagüelito (Ramos 1975)

En proximidades del arroyo Verde afloran areniscas y areniscas carbonáticas de la Formación Arroyo Verde (Malvicini y LLambías 1974).

Geomorfología

Los datos geomorfológicos fueron obtenidos a partir del relevamiento de toda la costa de la provincia, reconociéndose toda el área en dos campañas. La interpretación previa se efectuó a partir de las imágenes satelitales 226/88, 227/88, 227/89, 228/89 y 228/88, Landsat 7TM con resolución de 30 metros. También se utilizaron fotografías aéreas del IGM a escala 1:70.000. El uso de las imágenes satelitales, a partir del tratamiento digital combinando bandas y con la aplicación de filtros permitió diferenciar las áreas de interés. Esto fue particularmente útil en el área de planicies de marea, cordones litorales y plataformas litorales.

Trabajos previos, sobre la geomorfología del área fueron realizados por González Díaz y Malagnino (1984), dentro de un trabajo regional de toda la provincia de Río Negro Escala 1:1.000.000 y por Gelós *et al.* (1988, 1992a, 1992b y 1992c), quienes relevaron el área costera. También afectaron interpretaciones geomorfológicas Martínez *et al.* (1998) y Busteros *et al.* (1998), en el contexto de descripción de hojas geológicas.

El mapa geomorfológico, por razones de escala y de distribución gráfica fue dividido en tres partes (Figs. 2 y 3), donde se indican las distintas unidades geomórficas. Analizadas las mismas, luego son convertidas a un rango de valores numéricos, según esquema del cuadro 1.

Desplazamiento de la línea de costa

Hay escasa bibliografía sobre el desplazamiento de la línea de costa de la provincia de Río Negro, sin embargo sobre la base de recopilación de mapas, fotografías aéreas y labor de campo, se obtuvieron los datos necesarios para la aplicación del método.

Por recopilación de datos a escala mundial (Kokot 1999), se tienen posibles valores de erosión en función de la litología y a través de metodología implementada en C.E.R.C. (1984), y por la aplicación de la regla de Bruun (Bruun 1962), se estimaron valores de retroceso costero, en función de incrementos del nivel del mar o ascensos por tormentas.

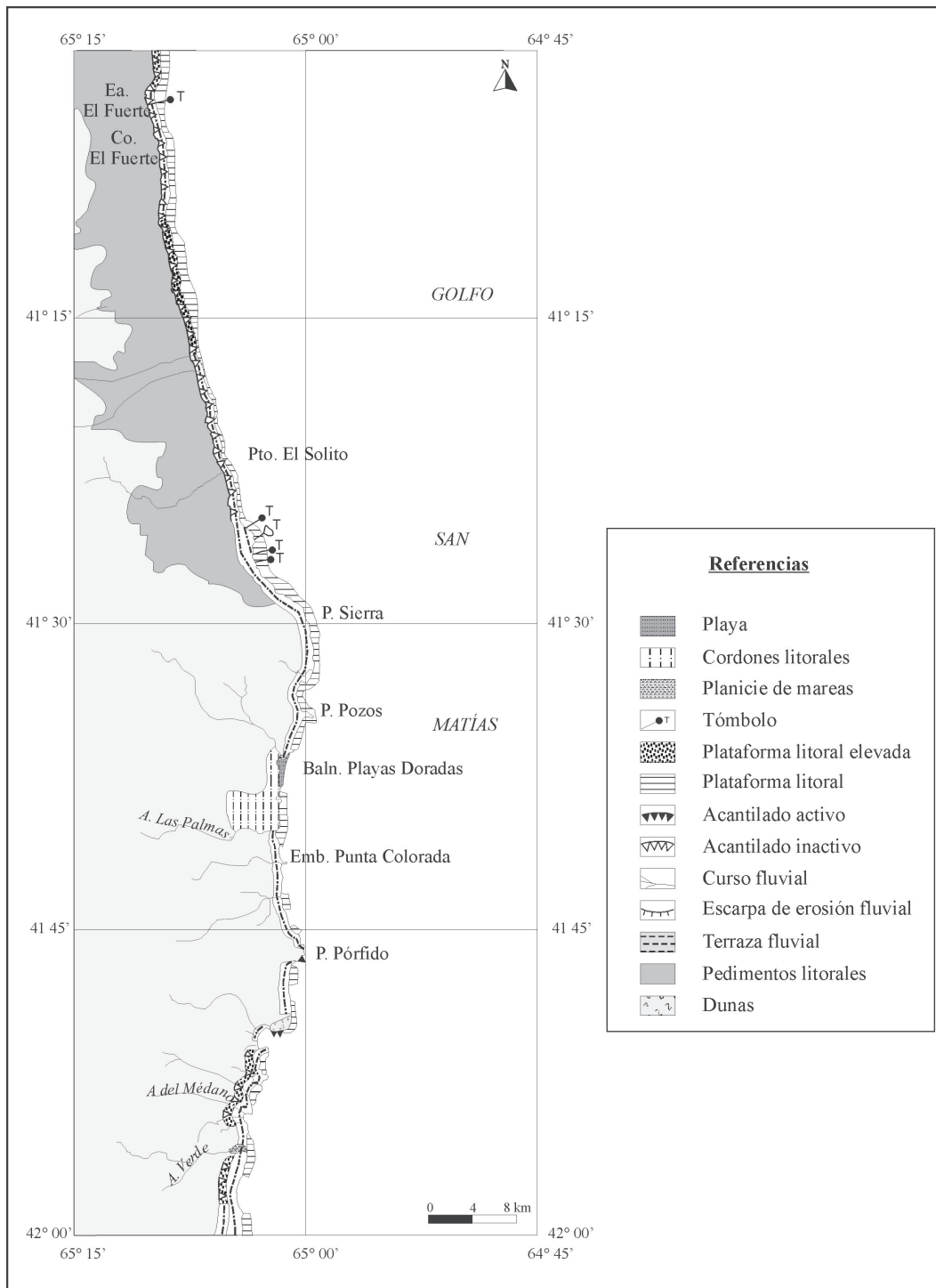


Figura 2: Mapa geomorfológico de la costa con orientación N-S de la provincia de Río Negro.

La velocidad de evolución, depende del tipo de rocas, de la energía y nivel de las olas que llegan a la base el acantilado y la cantidad de material abrasivo en movimiento por las olas en el sistema playa acantilado.

El retroceso de la costa acantilada, ubicada al oeste de la desembocadura del río Negro y casi hasta la punta Villarino, se estima del orden de los 0,5 m/año. En el caso de la costa sur de la provincia, donde los afloramientos

de la costa corresponden a rocas duras, pórfiros riolíticos, volcanitas y rocas graníticas, la costa permanece casi estable, ya que la erosión es lenta, presentando áreas de acumulación intermedia.

Respecto al incremento de las áreas de acumulación, éste fue cuantificado mediante datos suministrados por pobladores de las áreas involucradas y control de campo. Se reconocieron áreas de acumulación en la zona del bal-

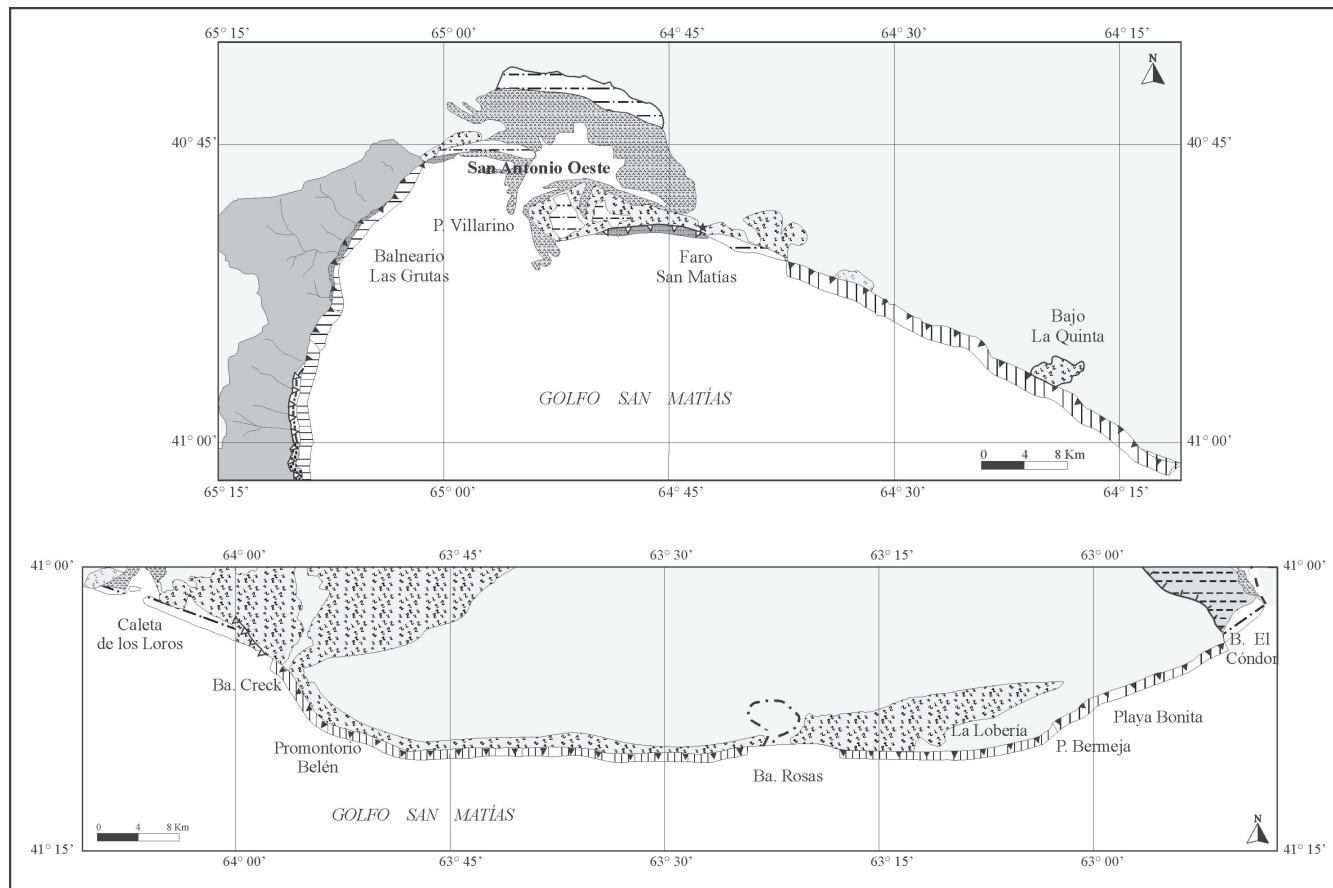


Figura 3: Mapas geomorfológicos del área San Antonio Oeste y de la costa con orientación E-O de la provincia de Río Negro. Referencias en la figura 2.

neario El Cóndor, en la zona de San Antonio Oeste – San Antonio Este y en la desembocadura del río Salado. El valor adjudicado a cada zona, según grado de erosión / acumulación, se indica en el cuadro 1.

Olas

El estudio del mar como factor dinámico modificador del contorno costero requiere el conocimiento de la energía involucrada en la incidencia de olas sobre las áreas costeras. Debido a que la energía es proporcional al cuadrado de la altura de las olas, esta medida da una idea de la competencia de las mismas para realizar trabajo sobre la costa, ya sea como fuerza de ataque sobre los afloramientos como por su capacidad para remover los sedimentos sobre la ribera.

Los datos de energía de olas incidentes sobre la costa argentina son escasos y en general no publicados, ya que los estudios están en general relacionados a obras de ingeniería portuaria. Pousa *et al.* (1995), estudian la energía oceánica en el sudoeste del Océano Atlántico e indican la distribución, en algunas localidades de la costa argentina de la potencia promedio y potencia máxima de olas, de la cual se toman los datos de Quequén, Playa Unión y

Comodoro Rivadavia. Asimismo, Lanfredi *et al.* (1992) dan valores de altura de ola en localidades costeras de la provincia de Buenos Aires, Puerto Quequén, la localidad más cercana a la provincia de Río Negro e indican: altura media de ola = 1,33 m, altura máxima de ola = 3,61m y un período de 8 segundos. También, Lanfredi y Framiñán (1986) realizan mediciones de altura de olas en Playa Unión, e indican que la altura media anual es de 0,87 m y que las mayores alturas de rompiente se observan en la estación invernal.

La altura de ola, ante la falta de datos en el área, fue obtenida por interpolación, a través de la estimación de altura de olas de otras localidades, y debido a que el método prevé utilizar la altura máxima de olas en un año, se optó por tomar alturas mayores a 3 m que coincide con el área de Quequén y también con otras observaciones efectuadas en área patagónica, donde las mayores alturas de ola, están asociadas a tormentas marinas que contribuyen a la modificación del contorno costero.

Rangos de marea

Los datos de amplitud de marea fueron tomados de las tablas de marea publicadas por Servicio de Hidrografía Naval (2003), donde se toman las amplitudes máximas

Cuadro 2: Niveles de marea para la costa de Río Negro.

Localidad	Latitud S (°)	Régimen de marea	Pleamar máxima	Bajamar más baja	Nivel medio
Pto. San Antonio (Muelle Este)	40,8	semidiurno	9,14	0,01	4,45
Río Negro (Punta Redonda)	41,03	semidiurno	4,32	0,00	2,13
Cargadero de Punta Colorada	41,77	semidiurno	8,79	0,04	4,45

* Servicio de Hidrografía Naval (2003).

para:

Puerto San Antonio (Muelle Este) = 9,03 metros.

Punta Redonda = 4,32 metros.

Cargadero Punta Colorada = 8,72 metros.

Las mareas astronómicas indican la existencia de un ambiente macromareal, que sumadas a las elevaciones producidas por mareas meteorológicas, producen sobreelevaciones muy importantes, con las consecuentes inundaciones de áreas bajas.

Asimismo, estas grandes alturas de marea, elevan el nivel, al cual las olas atacan los afloramientos costeros, produciendo la erosión de los mismos.

Se presentan los datos de nivel medio, pleamar y bajamar máxima de las localidades costeras de la provincia de Río Negro correspondientes a puertos patrones. Los planos de reducción corresponden al límite inferior de la media de las bajamares de sicigias y fueron obtenidos también de Servicio de Hidrografía Naval (2003) (Cuadro 2).

De lo expresado anteriormente y del cuadro 1, surge que corresponde grado 4 para el área de desembocadura del río Negro y grado 5 para el resto de la costa.

Resultados

De los resultados hallados para cada una de las siete variables previamente estudiadas y de la aplicación de la fórmula de Gornitz *et al.* (1990), resultan valores para cada celda, que se presentan en un diagrama de barras (Fig. 4).

Los coeficientes de vulnerabilidad costera obtenidos son de carácter adimensional, y los valores calculados se hallan comprendidos entre 8,3 y 41,4. El valor medio es de 22,7, la moda de 24,1, curtosis de -0,79, desviación estándar 9,84. Los percentiles 25, 50 y 75 son 14,1, 21,5 y 28,6 respectivamente.

Los resultados se dividieron en categorías de baja, moderada, alta y muy alta vulnerabilidad, basada en la amplitud de los cuartiles. Por inspección de los resultados y control de áreas involucradas, estos valores concuerdan con las expectativas de áreas de alta vulnerabilidad y de baja vulnerabilidad. Los valores por debajo de 14,1 se asignan a una categoría de vulnerabilidad baja. Entre 14,1 y 21,5 se consideran de vulnerabilidad moderada. Entre 21,5 y 28,6 se acepta una vulnerabilidad alta y los valores mayores a 28,6 se clasifican como áreas de vulnerabilidad muy alta.

La figura 4 muestra la zonificación del área según crite-

rios de vulnerabilidad costera, adjudicándose a cada una de las 43 celdas un color según se muestra en la figura. Los resultados muestran áreas de alta vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y por extensión a condiciones de peligrosidad de la costa actual.

Discusión

El índice de vulnerabilidad costera indica los posibles cambios de la costa debidos al futuro aumento del nivel del mar. El mapa puede servir de una base para desarrollar un inventario de variables más completo que pueden influenciar el índice de vulnerabilidad. También constituye un ejemplo del potencial para evaluar la vulnerabilidad costera al ascenso del nivel del mar utilizando criterios objetivos.

Los datos usados en el índice de vulnerabilidad costera muestran variabilidad en diversas escalas espaciales. Mientras que la tendencia de aumento del nivel del mar y rango de mareas cambia en una escala espacial de alrededor de 100 km, otras variables tales como la geología y geomorfología varían en una escala espacial de aproximadamente 10 km, mostrando los cambios ambientales y energéticos a lo largo de la costa. Los datos de erosión y acreción costera varían también en distancias pequeñas, coincidentes con el tamaño de la grilla. Estas variables de pequeña escala son las que generalmente inducen mayor variación a los índices de vulnerabilidad, por ello la geomorfología costera, geología y la topografía son las variables más importantes en la determinación del índice de vulnerabilidad. El grado de erosión y acreción (desplazamiento de la línea de costa), contribuyen a una gran variabilidad del índice en una pequeña escala, pero son los más difíciles de medir y las variables que estaban menos documentadas de este grupo de datos.

La cuantificación estadística del índice de vulnerabilidad, a partir de la amplitud de los cuartiles; expresados en grados desde bajo a muy alto, es una escala restringida a la zona de estudio. De ampliarse el área deberá replantearse el cálculo para generalizar los resultados. Así la escala, sobre la que se basan los resultados presentados, se restringe a la costa de la provincia de Río Negro.

Los tramos de costa analizados están representados por una celda de 10 km de lado, pero el área terrestre no es siempre la misma, debido a que la variada configuración costera condiciona una desigualdad de áreas.

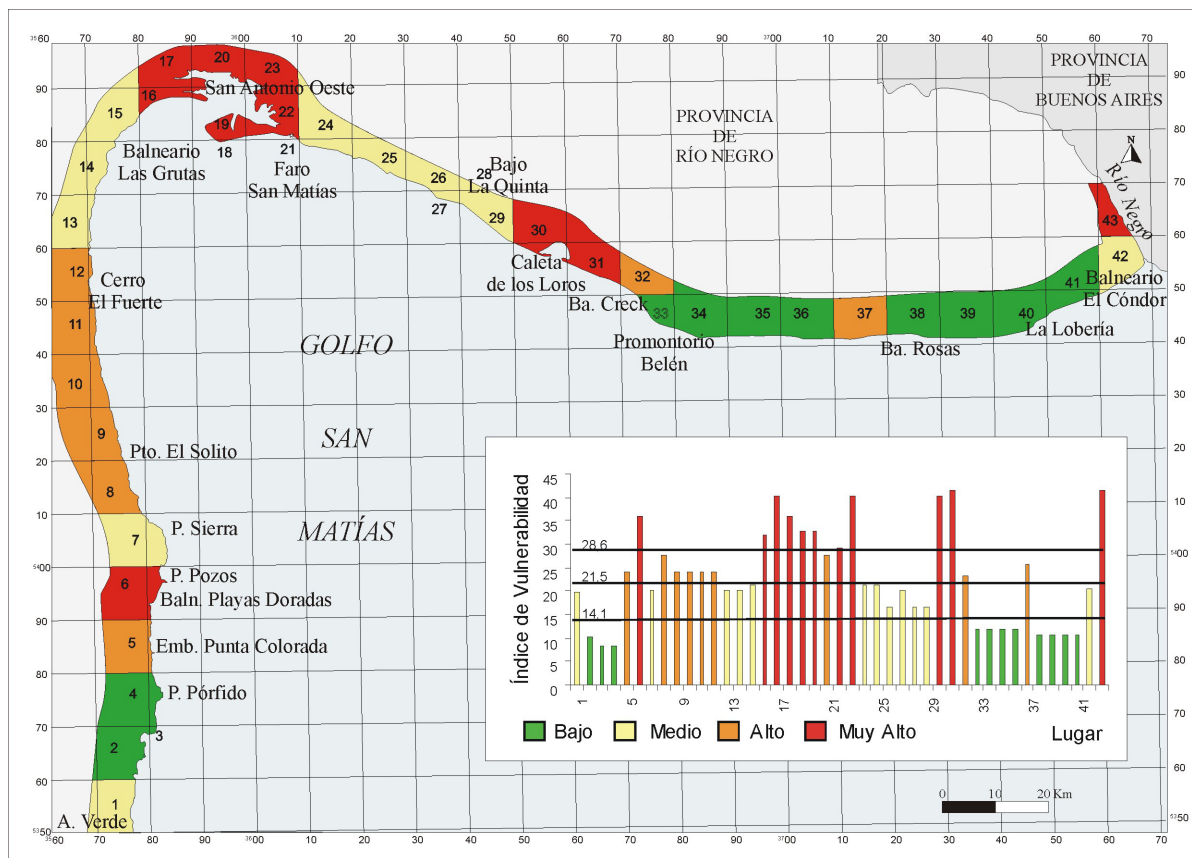


Figura 4: Mapa de vulnerabilidad costera de la provincia de Río Negro.

Conclusiones

Considerando los sectores costeros en función de los índices de vulnerabilidad obtenidos y representados en la figura 4, se considera lo siguiente:

Las zonas que presentan índice de vulnerabilidad muy alto (25% del total) corresponden a áreas bajas, fácilmente inundables y/o zonas de elevado retroceso costero por erosión marina. Estos lugares corresponden al estuario del río Negro en zona de desembocadura, caleta de Los Loros, área de San Antonio Oeste – San Antonio Este y balneario Playas Doradas.

Las zonas de vulnerabilidad alta (21% del total) están ubicadas inmediatamente al oeste de la bahía Rosas, de la bahía Creek, al este del faro San Matías, la área comprendida entre cerro el Fuerte y punta Sierra y en el sector del embarcadero de punta Colorada.

Las zonas de vulnerabilidad media (28% del total) son balneario El Cóndor (zona de acumulación marina), el área ubicada entre la caleta de Los Loros y el faro San Matías, el entorno del balneario Las Grutas, punta Sierra y arroyo Verde.

Las zonas de baja vulnerabilidad (26% del total) corresponden a áreas elevadas y/o con presencia de afloramientos de alta resistencia a la erosión. Estos sitios están ubicados al este y oeste de la bahía Rosas y corresponden a una línea de costa con acantilados altos. El área ubicada

desde la punta Pórfido hacia el sur, presenta afloramientos de alta resistencia a la erosión, y también es de baja vulnerabilidad.

Las zonas acantiladas mencionadas precedentemente y las correspondientes al área del balneario las Grutas, a pesar de corresponder a áreas de vulnerabilidad baja y media respecto al ascenso del nivel del mar, son zonas de alta peligrosidad debido a fenómenos de remoción en masa inducidos por erosión costera.

Agradecimientos

El presente trabajo fue financiado por subsidios UBACYT X141 y PIP-CONICET Res. N° 2851dic/98 ANPCyT - Programa de Modernización Tecnológica, Contrato Prestamo BID 1201/OC-AR. La CONAE suministró las imágenes satelitales Landsat 7.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Andrés, R.R., 1965. Petrografía y paleocorrientes de la Formación Río Negro (tramo General Conesa – Boca del Río Negro). Revista Museo de La Plata (n.s.) Geología 36: 245-310. La Plata.
- Angulo, R. y Casamiquela, R. 1982. Estudio estratigráfico de las unidades aflorantes en los acantilados de la costa norte del golfo San Matías

- (Río Negro y extremo austral de Buenos Aires) entre los meridianos 62° 30' y 64° 30'. *Mundo Ameghino* 2: 20 - 73.
- Angulo, R., Fidalgo F., Gomez Peral A. y Schnack E., 1978. Las ingresiones marinas cuaternarias en la Bahía de San Antonio y sus vecindades. Provincia de Río Negro. VII Congreso Geológico Argentino (Neuquén) Actas 1: 271-283.
- Bayarsky, A. y Codignotto, J.O., 1982. Pleistoceno-Holoceno marino en Puerto Lobos, Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 37 (1): 91-99.
- Bruun, P., 1962. "Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion," *Journal of Waterways and Harbor Division, American Society of Civil Engineers* 88: 117-130.
- Busteros, A., Giacosa, R., Lema, H. y Zubia, M., 1998. Hoja Geológica 4166-IV, Sierra Grande, Provincia de Río Negro. SEGEMAR, 75p.
- Cendrero, A., 1987. Riesgos Geológicos, Ordenación del Territorio y Protección del Medio Ambiente. I Curso de Riesgos Geológicos. Instituto Geológico Minero de España. Madrid.
- C.E.R.C., 1984. (Coastal Engineering Research Center). *Shore Protection Manual*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers. fourth edition, 2 vols 1088 p.
- Codignotto, J.O., Kokot R.R. y Marcomini S.C., 1992. Neotectonism and Sea-Level Changes in the Coastal Zone of Argentina. *Journal of Coastal Research* 8(1): 125-133.
- Del Río, C.J. y Martínez, S.A., 1998. El Mioceno marino en la Argentina y en el Uruguay. En: C. J. del Río (ed.), *Moluscos marinos Miocenos de la Argentina y del Uruguay*. Monografía de la Academia Nacional de Ciencias Exactas Físicas y Naturales 15 (1): 6- 25.
- Dennis, K.C., Schnack E.J., Mouzo, F.H. y Orona, C.R., 1995. Sea-Level Rise and Argentina: Potential Impacts and Consequences. *Journal of Coastal Research, Special Issue 14*: 205-223.
- DETR, 1999. *Climate Change and its Impacts: Stabilisations of CO2 in the Atmosphere*. United Kingdom Department of Environment, Transport and the Regions. The met Office, Bracknell, UK, 28 p.
- Fairbridge, R.W., 1961. Eustatic Changes in sea-level. *Physical and Chemical Earth* 4: 99-185.
- Feruglio, E., 1950. Descripción Geológica de la Patagonia, Dirección General de Yacimientos Petrolíferos Fiscales 3: 431 p.
- Fidalgo, F. y Porro N.E., 1981. Descripción geológica de la Hoja 39j, San Antonio Oeste, Provincia de Río Negro. Servicio Geológico Nacional (informe inédito) 75 p.
- Finkl, C.W., 1994. Coastal Hazards, Perception, Susceptibility and Mitigation. *Journal of Coastal Research, Special Issue 12*,: 1-372, Florida.
- Gelós, E.M., Spagnuolo J.O. y Schillizzi, R.A., 1988. Las unidades morfológicas de la costa norte del Golfo San Matías y su evolución. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 43(3): 315-326.
- Gelós, E.M., Schillizzi, R.A y Spagnuolo J.O., 1992a. El Cenozoico de la costa norte del Golfo San Matías, Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 47(2): 135-140.
- Gelós, E.M., Schillizzi, R.A y Spagnuolo J.O., 1992b. El Mesozoico superior-Cenozoico de la costa occidental del Golfo San Matías. *Revista de la Asociación Geológica Argentina, Nota Breve* 47(4): 423-426.
- Gelós, E.M., Spagnuolo J.O. y Schillizzi, R.A., 1992c. Las unidades morfológicas de la costa oeste del Golfo San Matías y su evolución. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 47(4): 365-371.
- Giacosa, R., 1993. El ciclo eruptivo Gondwánico en el área de Sierra Pailemán, Macizo Nordpatagónico, Argentina. Duodécimo Congreso Geológico Argentino y Segundo Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas 4: 113-119
- González Díaz E.F y Malagnino E.C., 1984. Geomorfología. IX Congreso Geológico Argentino. S.C. de Bariloche. Relatorio I(13): 347-364.
- Gornitz, V., 1990. Vulnerability of the East Coast, U.S.A. to future sea level rise. *Journal of Coastal Research, Special Issue 9*: 201-237.
- Gornitz, V., Beaty T.W. y Daniels R.C., 1997. A Coastal Hazards Data Base for the U.S. West Coast. Oak Ridge National Laboratory. Environmental Sciences Division Publication 4590 78 p.
- Gornitz, V.M., Daniels, R.C., White, T.W. y Birdwell, K.R., 1994. The Development of a Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast. *Journal of Coastal Research Special Issue 12*: 327-338.
- Haller, M. 1978. Estratigrafía de la región al poniente de Puerto Madryn. 7º Congreso Geológico Argentino (Neuquén), Actas 1: 285 - 297.
- Haller, M.J. y Mendía J.E., 1980. Las sedimentitas del ciclo Patagónico en el litoral atlántico nordpatagónico. Coloquio "Ricardo Wichman" Asociación Geológica Argentina, 28: 11-80.
- IPCC, 2001. *Climate Change. Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University. 878 p.
- Kaasschieter, J.P.H., 1965. Geología de la Cuenca del Colorado. Segundas Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 3: 251-269. Buenos Aires.
- Kokot, R.R., 1999. Cambio climático y evolución costera en Argentina. Tesis Doctoral, FCEyN, Universidad de Buenos Aires (inédita) 329 p.
- Lanfredi, N.W. y Framiñán M.B., 1986. Fiel Study and Prediction of Longshore Currents, Argentine Coast. *Journal of Coastal Research* 2(4): 409 - 417.
- Lanfredi, N.W., D'Onofrio, E.E. y Mazio C.A., 1988. Variations of the mean sea level in the southwest Atlantic Ocean. *Continental Shelf Research* 8(11): 1211-1220.
- Lanfredi, N.W., Pousa J.L., Mazio C.A. y Dragani W.C., 1992. Wave-power potential along the coast of the province of Buenos Aires, Argentina. *Energy* 17 (11): 997-1006.
- Lizuain, A. y Sepúlveda, E., 1978. Geología del Gran Bajo del Gualicho (Provincia de Río Negro). VII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Actas 1: 407-422.
- Malvicini, L. y Llambías E., 1974. Geología y génesis del depósito de manganeso Arroyo Verde, provincia del Chubut. Vº Congreso. Geológico Argentino, Actas 2: 185-202, Buenos Aires.
- Martínez, H., Nández, C., Lizuain, A., Dal Molin, C., Turel, A., Dalponte, M. y Faroux, A., 1998. Descripción de la Hoja Geológica 4166-II, San Antonio Oeste Provincia de Río Negro. SEGEMAR, 70p.
- Mörner, N.A., 1976. Eustasy and geoid changes. *Journal of Geology* 84: 123-151.
- Nicholls, R.J., Hossemans F.M.J. y Marchand M., 1999. Increasing Flood risk and wetland losses due to sea level rise: regional and global analyses. *Global Environmental Change*, 9: 569-587.
- Parry, M., Armell N., Memichael T., Nicholls R., Martens P., Kovats S., Livermore M., Rosenzweig C., Iglesias A. y Fischer G., 2001. Millions at Risk. *Global Environment Change* 11(3): 1-3.
- Pousa, J.L., Dragani W.C., Mazio C.A. y Lanfredi N.W., 1995. La energía oceánica en el Atlántico sudoccidental. Posibilidades e impacto ambiental. *Thalassas* 11: 59-72.
- Ramos, V., 1975. Geología del sector oriental del Macizo Nordpatagónico entre Aguada Capitán y la mina Gonzalito, provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 30(3): 274-285.
- Sato A.M., Tickyj H. y Llambías E.J., 1998. El Basamento Igneo-Metamórfico del Área de Las Grutas, Provincia de Río Negro, Argentina. Xº Congreso Latinoamericano de Geología y VIº Congreso Nacional de Geología Económica, Actas 1: 65-70, Buenos Aires.
- Shaw, J., Taylor R.B., Solomon S., Christian H.A. y Forbes D.L., 1998. Potential Impacts of Global Sea-Level Rise on Canadian Coasts. *The Canadian Geographer* 42(4): 365-379.
- Servicio de Hidrografía Naval, 2003. Tablas de marea. Publicación H610, 505 p. Buenos Aires.
- UNDRO (1979). *Natural Disasters and Vulnerability Análisis*, Report of Expert Group Meeting, 145 p. Geneva.
- Varela, R., Cingolani C., Sato A., Dalla Salda L., Brito Neves B.B., Basei M.A.S., Siga Jr. O. y Teixeira, Y.W., 1997. Proterozoic and Paleozoic evolution of Atlantic area of North-Patagonian Massif, Argentina. *South-American Symposium on Isotope Geology, Acta*: 326-329, San Pablo.
- Warrick, R.A. y Oerlemans, J., 1990. Sea level rise. In: Hughton, J.T.; Jenkins, G.J. y Ephraums, J.J. (eds), *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge, England: Cambridge University Press: 257-281.
- Weber, E.I., 1983. Descripción geológica de la Hoja 40j, Cerro El fuerte, provincia de Río Negro. Servicio Geológico Nacional Boletín 196, 69 p. Buenos Aires.

Recibido: 4 de junio, 2003

Aceptado: 7 de julio, 2004