



FaIn·UNCo
Facultad de Ingeniería

Departamento de Geología y Petróleo

Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas

**Distribución de Estructuras Sedimentarias Inducidas por Actividad
Microbiana (ESIAM) en planicies de marea de San Antonio Este, Río
Negro**

Alumno: Calderón, Sergio Martin

Legajo.: ING-6738

DNI: 39880804

Director: Rodríguez, Maximiliano Nicolás

Neuquén, noviembre 2024



RESUMEN

La planicie de marea de la bahía San Antonio Este ubicada en la porción norte del golfo San Matías, en la Provincia de Río Negro, está constituida principalmente por sedimentos silicoclásticos limosos y arenosos y es afectada por un régimen de marea del tipo semidiurna. Esta planicie experimenta cambios diarios bruscos en el nivel del mar debido a las características macromareales de la marea, que le otorgan condiciones adecuadas para el establecimiento de matas microbianas.

Las matas microbianas son capas de 1 a 2 cm de espesor, compuestas por comunidades de microorganismos fotótrofos, quimiótrofos y heterótrofos que colonizan los sedimentos formando un manto microbiano a través de la segregación de una biopelícula y el entrelazado de sus filamentos. La interacción de las matas microbianas con los sedimentos y las condiciones del ambiente originan las llamadas Estructuras Sedimentarias Inducidas por Actividad Microbiana (ESIAM). El estudio de la actividad microbiana en las planicies de mareas de nuestro país ha ido incrementando con el paso del tiempo, sin embargo, aún no se ha realizado un análisis de detalle al respecto en la bahía de San Antonio Este.

El objetivo principal del Trabajo Final de Licenciatura es identificar, caracterizar y delimitar las ESIAM en la planicie de marea de San Antonio Este, con el fin de elaborar un mapa geológico centrado en la distribución de las ESIAM reconocidas y determinar su génesis. Además, se busca comparar las ESIAM actuales del área de estudio con ESIAM fósiles descritas en la bibliografía para ambientes similares.

La metodología del trabajo consistió en visitar la zona de estudio durante la bajamar y pleamar, y registrar las ESIAM utilizando una cámara fotográfica. A partir de las imágenes aéreas tomadas con un dron, se generó un mapa detallado del área de estudio utilizando el software QGIS. Finalmente, se compararon las ESIAM actuales con las fósiles descritas en la bibliografía para ambientes similares.

Como resultado del estudio realizado sobre la planicie de marea se registraron un total de cinco tipos de ESIAM diferentes: domos de gas, grietas de contracción, enrollamientos, fragmentos de matas, bolsillos de erosión y remanentes de matas. Estas estructuras fueron halladas principalmente en la zona intermareal y en menor medida en la zona supramareal,

observándose una correlación entre la dinámica que caracteriza a cada zona y la existencia de cada tipo de estructura.

La comparación realizada destaca cómo la actividad microbiana y los procesos hidrodinámicos han generado ESIAM similares en distintos periodos de tiempo.

Palabras claves: Matas microbianas, estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana, ESIAM, domos de gas, grietas de contracción, enrollamientos, fragmentos de mata, bolsillo de erosión y remanentes de matas.

ABSTRACT

The tidal plain of San Antonio Este bay, located in the northern portion of San Matías gulf, in the Río Negro Province, is mainly made up of silt and sandy siliciclastic sediments and is affected by a semidiurnal tidal regime. This plain experiences abrupt daily changes in sea level due to the macrotidal characteristics of the tide, which provide suitable conditions for the establishment of microbial mats.

Microbial mats are 1 to 2 cm thick layers, composed of communities of phototrophic, chemotrophic and heterotrophic microorganisms that colonize sediments forming a microbial mantle through the segregation of a biofilm and the interlacing of its filaments. The interaction of microbial mats with sediments and environmental conditions give rise to the so-called Microbial Induced Sedimentary Structures (MISS). The study of microbial activity in tidal flats in Argentina has been increasing over time, however, a detailed analysis in the San Antonio Este bay has not yet been carried out.

The main objective of the Final Degree Project is to identify, characterize and delimit the MISS in the San Antonio Este tidal flat, in order to draw up a geological map focused on the distribution of the recognized ESIAMs and determine their genesis. In addition, it seeks to compare the current MISS in the study area with fossil MISS described in the literature for similar environments.

The methodology of the work consisted of visiting the study area during low and high tide, and recording the MISS using a camera. From the aerial images taken with a drone, a detailed map of the study area was generated using the QGIS software. Finally, the current MISS were compared with the fossil MISS described in the literature for similar environments.

As a result of the study carried out on the tidal flat, a total of five different types of MISS were recorded: gas domes, contraction cracks, roll-ups, mat fragments, erosional remnants and pockets. These structures were found mainly in the intertidal zone and to a lesser extent in the supratidal zone, observing a correlation between the dynamics that characterize each zone and the existence of each type of structure.

The comparison highlights how microbial activity and hydrodynamic processes have generated similar MISS over different time periods.



Keywords: Microbial mats, microbially induced sedimentary structures, MISS, gas domes, contraction cracks, roll-up, mat fragments, erosion pocket and remnants.

RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Al concluir este trabajo, el cual representa el fin de una etapa muy importante en mi vida, quiero expresar mis agradecimientos a todas las personas que formaron parte e hicieron que fuera posible.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director, Maximiliano, por el acompañamiento brindado a lo largo de este tiempo, por la gran predisposición y aporte de ideas.

Agradecer a los jurados: de la Puente, Susana, Garrido, Alberto y Molina, Andrés, por las correcciones y sugerencias realizadas, ya que las realizaciones de las mismas enriquecieron notablemente el Trabajo Final de Licenciatura.

A la Universidad pública, gracias, ojalá seas eterna.

A los profesores que me formaron durante el transcurso de la carrera, tanto en forma académica como personal. Las discusiones, dudas resueltas y experiencias compartidas durante estos años han sido invaluable.

Agradecerles a mis hermanos, a cada uno de ellos, por su amor incondicional, comprensión y siempre estar. Su apoyo fue fundamental para lograr este objetivo.

A mis amigos de siempre, los amigos de la Deps, mi cable a tierra.

A mis amigos que me dió la carrera, de las cosas más valiosas que me llevo. Gracias por los mates, las risas, los viajes, por todos los momentos que hicieron que estos años hayan sido de los más lindos.

Ivana, gracias por siempre estar.

Y, por último, mi agradecimiento más profundo es para Loreta, mi mamá, la persona que más admiro y amo. No hay palabras suficientes, ni sé si existen, para expresar cuán agradecido estoy con vos.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIAS	v
ÍNDICE GENERAL	vi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Geobiología	1
1.2 Matas microbianas	1
1.3 Biopelícula.....	3
1.4 Estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana	3
1.5 Planicies de marea	6
2 OBJETIVOS	8
2.1 Objetivo general	8
2.2 Objetivos específicos	8
3 MARCO GEOLÓGICO	9
3.1 Ubicación geográfica.....	9
3.2 Marco geológico.....	9
3.3 Geomorfología.....	12
3.3.1 Bahía	13
3.3.2 Espigas	14
3.3.3 Llanura de marea y marisma.....	14
3.3.4 Canales de marea	14
3.3.5 Cordones litorales	15
3.3.6 Médanos.....	15
3.4 Mareas	15

4	MATERIALES Y MÉTODOS	17
5	RESULTADOS	18
5.1	ESIAM identificadas	21
5.1.1	Domos de gas.....	21
5.1.2	Grietas de contracción	22
5.1.3	Enrollamientos	23
5.1.4	Fragmentos de matas	24
5.1.5	Bolsillos de erosión y remanentes de matas	25
5.2	Distribución de las ESIAM en la planicie de marea.....	27
6	DISCUSIÓN	29
6.1	Desarrollo de las ESIAM.....	29
6.1.1	Distribución y génesis de los domos de gas	29
6.1.2	Distribución y génesis de las grietas de contracción	30
6.1.3	Distribución y génesis de los enrollamientos	31
6.1.4	Distribución y génesis de los fragmentos de matas	32
6.1.5	Distribución y génesis de los bolsillos de erosión y remanentes de matas	33
7	COMPARACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS HALLADAS CON EL REGISTRO FÓSIL	34
7.1	Domos de gas	34
7.2	Grietas de contracción	36
7.3	Fragmentos de matas	38
7.4	Enrollamientos.....	39
7.5	Bolsillos de erosión y remanentes de matas	40
8	CONCLUSIONES	43
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Geobiología

A lo largo de la historia, la evolución de la ciencia dió lugar al desarrollo de una amplia variedad de disciplinas especializadas. Entre estas se encuentra la geología, encargada de estudiar la historia de la Tierra a lo largo del tiempo, y la biología, centrada en la comprensión de la vida en el tiempo presente. La generación de nuevas preguntas y áreas de investigación proporciona el contexto idóneo para el surgimiento de la geobiología, una rama de la ciencia interdisciplinaria que surge de la colaboración entre la geología y la biología, que busca comprender la historia de la Tierra y la vida (Noffke, 2002, 2010).

La geobiología tiene como objetivo principal documentar los procesos geobiológicos, es decir, aquellos fenómenos que resultan de la interacción entre procesos biológicos y geológicos. En segundo lugar, busca identificar estructuras, fósiles o minerales en litologías consolidadas (Noffke, 2002). La disciplina no solo considera los parámetros biológicos y geológicos como elementos interconectados, sino que también cuantifica las influencias de ambos conjuntos de parámetros, los cuales ayudan a comprender la dinámica del sistema de vida en la Tierra (Olszewski, 2001). Además, contribuye a detectar características litológicas, entender cómo se formaron las mismas en contextos paleoambientales específicos, y reconstruir el proceso tafonómico y las alteraciones diagenéticas que ocurrieron durante la consolidación del sedimento (Noffke, 2002). Este enfoque resulta fundamental para comprender la importancia de las matas microbianas, las cuales representan uno de los ejemplos más claros de la interacción entre procesos biológicos y geológicos en entornos sedimentarios actuales y antiguos.

1.2 Matas microbianas

Las matas microbianas son un manto de espesor variable, el cual ronda entre 1 y 2 cm, y está conformado por comunidades de microorganismos fotótrofos, quimiótrofos y heterótrofos. Estas comunidades debido a gradientes de luz, oxígeno y sulfuro forman colonias que se ordenan en estructuras laminares, y desarrollan interacciones entre sí,

mediante las cuales logran su subsistencia (Fig. 1) (Van Gernerden, 1993; Stal, 2012). A su vez, estas colonias microbianas por medio de la segregación de una biopelícula y/o la acción entrelazante de sus filamentos, colonizan los sedimentos sobre el cual se desarrollan, formando así el manto microbiano (Van Gernerden, 1993; Schieber, 2004).

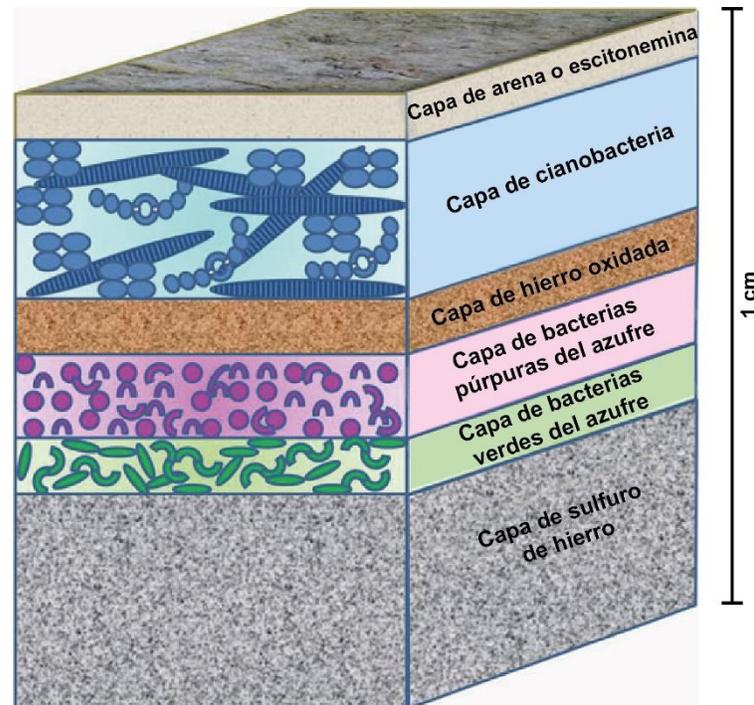


Figura 1. Bloque diagrama de la distribución laminar de los microorganismos y sedimentos en una mata microbiana originada en un ambiente de planicie de marea (extraído y modificado de Rodríguez, 2023).

Entre los microorganismos desarrolladores de matas se encuentran las cianobacterias, y microorganismos asociados a la existencia de compuestos de azufre, como las bacterias incoloras del azufre, bacterias púrpuras del azufre y bacterias reductoras de sulfato (Van Gernerden, 1993). Los distintos microorganismos forman un sistema en el cual utilizan concentraciones de oxígeno y sulfuro como compuestos principales de donde obtienen energía para poder desarrollarse en distintas condiciones ambientales, incluso algunas extremas, llegándose a encontrar en lagunas costeras hipersalinas, aguas termales, lagos alcalinos y zonas marinas intermareales (Stal *et al.*, 1985; Van Gernerden, 1993).

Las cianobacterias, dependientes de la fotosíntesis oxigenada, se ubican en la capa superior de la mata y producen restos orgánicos aprovechados por las colonias subyacentes. Por debajo de la colonia de cianobacterias los microorganismos quimiótrofos descomponen los desechos orgánicos y se generan condiciones anaeróbicas permanentes. Como resultados se desarrollan microorganismos anaeróbicos reductores de sulfato y generadores de sulfuros. Este sulfuro es luego aprovechado por bacterias fotótrofas anoxigénicas para su propio desarrollo (Van Gemerden, 1993; Stal, 2012).

Los factores principales que intervienen en el desarrollo de las matas microbianas en un ambiente sedimentario son: el tamaño de grano del sedimento que los microorganismos colonizan, transmisión de la luz en el medio, desarrollo de agua capilar, tasa de sedimentación y erosión (Walter, 1976).

1.3 Biopelícula

Una característica muy importante para que se produzca el desarrollo de matas microbianas es la segregación de una matriz de sustancia polimérica extracelular (SPE) por los propios microorganismos, mediante la cual se van a fijar las células microbianas a una superficie, conformando así una biopelícula. Esta matriz consiste en un gel perfectamente estructurado que envuelve al conjunto de colonias microbianas, y va a permitir que el desarrollo sea altamente efectivo (Wingender *et al.*, 1999; De Beer y Stoodley, 2006; Anekant *et al.*, 2007).

Las SPE que forman parte de la biopelícula van a cumplir funciones de vital importancia. Estos polímeros extracelulares van a inmovilizar las células conformando una estructura tridimensional altamente hidratada que funciona como barrera protectora, donde se va a establecer la comunicación entre las distintas colonias celulares, y cuyas interacciones permitirán el desarrollo de un sistema digestivo en el cual se aprovechen al máximo los nutrientes para la obtención de energía de distintas fuentes (Wingender *et al.*, 1999).

1.4 Estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana

Durante el establecimiento y desarrollo de matas microbianas en un ambiente determinado, el conjunto de microorganismos cubre la superficie del sedimento, otorgándole

una estructura firme y resistente, alterando considerablemente la susceptibilidad a la erosión. Dependiendo de las condiciones del ambiente y de las características de las especies involucradas, las matas microbianas pueden desarrollar estructuras con diferentes morfologías (Jorgensen *et al.*, 1983; Gerdes *et al.*, 1993, 2000; Paterson y Black, 2000).

Según Gerdes *et al.* (1991) las reacciones y actividades que realizan los microorganismos van a depender de cómo se desarrolle el ambiente ecológico en el que se encuentran, logrando así distintos comportamientos. Estos microorganismos van a responder a la desecación periódica o a la hidratación de la superficie mediante una potenciación o disminución de su crecimiento, donde un mayor contenido de humedad favorecerá su desarrollo, o la secreción de una mayor cantidad de SPE para protegerse de la radiación solar, como así también de la presión osmótica que provoca un alto valor en la salinidad. Cuando son cubiertos por sedimentos estos microorganismos tienden a colonizar la nueva cubierta sedimentaria, mediante una migración hacia la superficie, o también realizan movimientos provocados por una incidencia de luz, siendo atraídos por esta.

El término ESIAM (acrónimo de estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana) (Bournod *et al.*, 2014) corresponde a la traducción del término inglés MISS (*microbially induced sedimentary structures*), expresión que fue introducida por Noffke *et al.* (1996).

Noffke (2009) definió a las ESIAM como estructuras sedimentarias primarias que surgen de manera no depositacional mediante la interacción de las matas microbianas con la dinámica de los sedimentos en ambientes acuáticos silicoclásticos. Las ESIAM constituyen un grupo de 17 estructuras sedimentarias (Fig. 2) de morfologías que abarcan escalas de metros a pocos milímetros (Noffke, 2009; Noffke *et al.*, 2022).

Las interacciones biótico-físicas señaladas por Noffke (2009) que están involucradas en la formación de las estructuras son (Fig. 2):

- Bioestabilización, desarrollada principalmente por la segregación de SPE aumentando la estabilidad, la cual contrarresta la erosión.
- Deflexión y captura, como respuesta a la depositación de sedimentos. En la deflexión cuando nuevos granos cubren a los microorganismos, estos reorientan sus filamentos hacia arriba “atrapando” el nuevo material para luego desplazarse hacia arriba. En el

caso de la captura, el encargado de “atrapar” a los nuevos granos de sedimentos es el EPS mediante la aglutinación de los mismos.

- Unión, tiene lugar durante los períodos de tiempo sin retrabajo de sedimentos. Cuando las condiciones hidrodinámicas son lo suficientemente tranquilas, las matas microbianas tienen la capacidad de desarrollar redes entre sí.
- Crecimiento, al igual que la unión, tienen lugar durante los períodos de tiempo sin retrabajo de sedimentos. Cuando la mata microbiana se encuentra en condiciones favorables en términos de luminosidad, disponibilidad de nutrientes, temperatura, salinidad y pH, los microorganismos tienen la capacidad de generar biomasa mediante la replicación celular.
- Interferencia, ocurre cuando algunas o todas las actividades que realiza la mata microbiana; bioestabilización, deflexión, captura, unión y crecimiento, se desarrollan en conjunto como respuesta a la interacción con la dinámica física de los sedimentos.

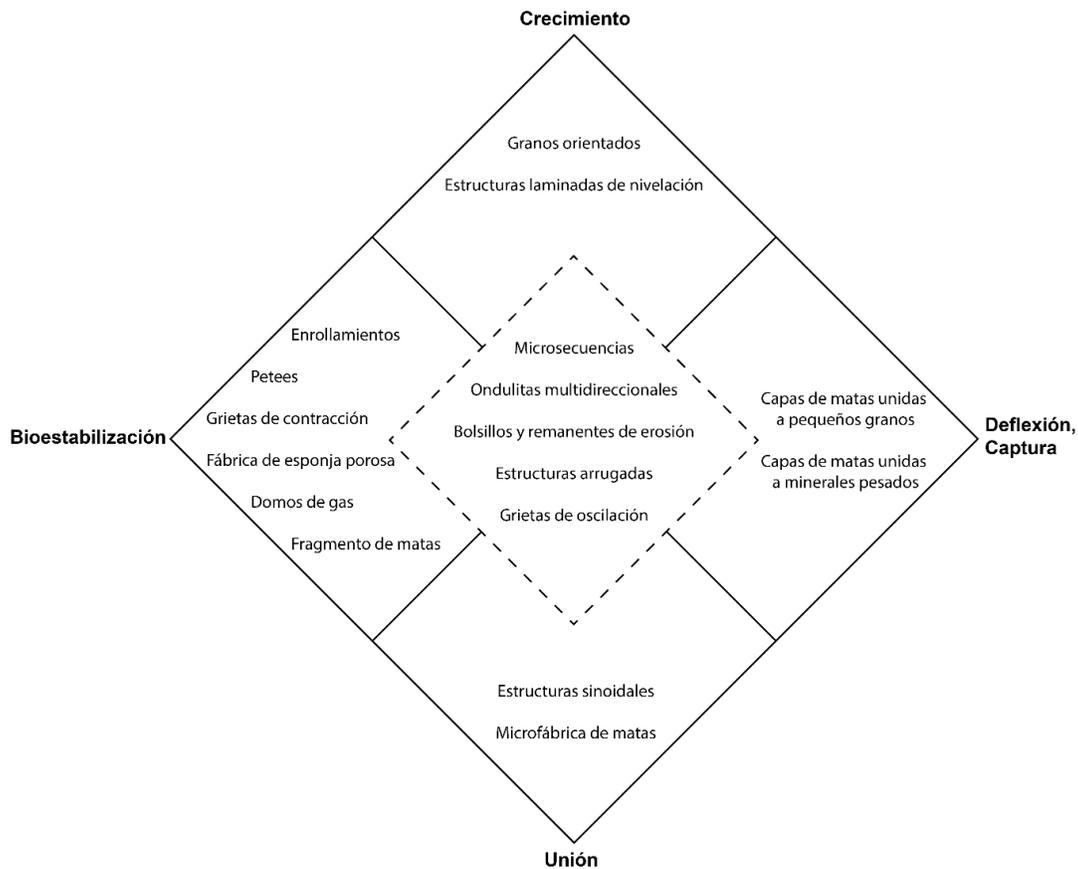


Figura 2. Clasificación de ESIAM según las interacciones biótico-físicas (extraído y modificado de Noffke et al., 2022).

La preservación de estas estructuras se facilita con la acreción de minerales secundarios derivados de la descomposición de la biopelícula, los microorganismos y de los SPE (Noffke, 2009).

1.5 Planicies de marea

Las planicies de mareas, según Vilas *et al.* (2010), son extensiones de terreno ubicadas en zonas costeras donde se desarrollan sistemas depositacionales caracterizados por áreas de baja pendiente, influenciadas directamente por las corrientes mareales. Este entorno abarca desde el punto más alto del nivel del agua del mar durante el ciclo de las mareas (pleamar) hasta el punto más bajo (bajamar). Estas planicies son más comunes en costas mesomareales, donde la amplitud alcanzada por la marea es superior a 2 m, y costas macromareales, cuya amplitud de marea es superior a 4 m (Vilas *et al.*, 2010).

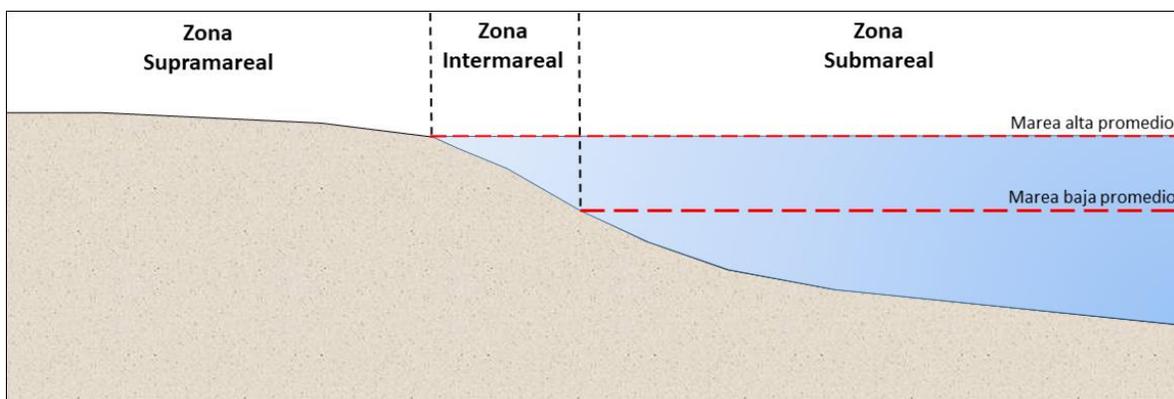


Figura 3. Dibujo esquemático bidimensional de los subambientes de deposición desarrollados en una planicie de marea.

Una planicie de mareas puede dividirse en tres subambientes de deposición dispuestos de forma paralela a la costa, con extensiones variables que dependen de la pendiente existente y del alcance de las mareas (Fig. 3) (Morales, 2022). A continuación, se sintetizan los tres subambientes de deposición:

Zona submareal: superficie que está ubicada bajo agua durante el período de mareas bajas promedio, lo que significa que no se descubre completamente durante ese periodo. La

exposición de esta área al aire y a la atmósfera es limitada, quedando generalmente sumergida.

Zona intermareal: abarca el espacio entre la línea promedio de las mareas altas y la línea promedio de las mareas bajas, experimentando continuamente cambios entre momentos de exposición y sumersión. La parte más baja de esta llanura se sumerge con mayor frecuencia, mientras que la parte más elevada se expone con mayor regularidad. Esta área específica se caracteriza por una dinámica constante entre la exposición y la inmersión, dando lugar a distintos sectores con características únicas.

Zona supramareal: se desarrolla en el área por encima de la línea promedio de las mareas altas, inundándose solamente cuando ocurren las mareas extraordinarias o durante la ocurrencia de tormenta.

En los ambientes costeros, especialmente en donde se desarrollan planicies de mareas, es característica la generación de cursos de agua impulsados por la propia energía de las mareas. Estos cursos, representados por hendiduras longitudinales, conforman un sistema circulatorio dentro del cual se transporta agua, sedimentos, nutrientes y contaminantes, provocando el intercambio de sustancias y de vida (Perillo, 2009).

Perillo (2009), clasificó los cursos presentes en una planicie de marea según el tamaño y la persistencia de agua en los mismos durante la ocurrencia de los periodos de bajamar (Tabla 1).

En las planicies de marea, debido a que la altura del agua que se alcanza es reducida, la luz penetra lo suficiente como para sostener el desarrollo de la fotosíntesis en el fondo (Zapperi, 2015).

Nombre	Agua en bajamar	Profundidad (cm)	Ancho (cm)
Surco	no	< 1	< 2
Cava	no	1-5	2-10
Cárcava	no	5-100	10-100
Arroyo	sí	10-200	10-200
Canal	sí	> 200	> 200

Tabla 1. Clasificación de los distintos cursos de agua posibles en una planicie de marea (extraído de Perillo y Piccolo, 2017).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

El objetivo general del Trabajo Final de Licenciatura (TFL) consiste en identificar, caracterizar y delimitar en un área de la planicie de marea de la bahía San Antonio Este las estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM), con el propósito de realizar un mapa geológico centrado en la distribución de las ESIAM reconocidas y determinar la génesis de cada una de ellas.

2.2 Objetivos específicos

Para el desarrollo del TFL se designaron una serie de objetivos específicos que consisten en:

- Delimitar la zona con presencia de ESIAM en imágenes aéreas tomadas con dron en la zona de planicies de marea de San Antonio Este (entre los $64^{\circ}44'50''\text{O}$ - $64^{\circ}45'04''\text{O}$ y $40^{\circ}48'36''\text{S}$ - $40^{\circ}48'27''\text{S}$).
- Identificar y fotografiar en el campo las diversas ESIAM existentes en el área de estudio.
- Confeccionar un mapa de detalle que muestre la distribución de las distintas ESIAM en el área analizada.
- Determinar la génesis de las distintas ESIAM halladas.
- Comparar las ESIAM presentes en el área de estudio con ESIAM fósiles descritas para ambientes similares en la bibliografía existente.

3 MARCO GEOLÓGICO

3.1 Ubicación geográfica

El área de estudio se localiza al este de la bahía San Antonio Este, situada en la costa de la Provincia de Río Negro, Argentina, al norte del golfo San Matías (Fig. 4). Las coordenadas geográficas del área de interés se extienden desde $64^{\circ}44'50''\text{O}$ hasta $64^{\circ}45'04''\text{O}$ en longitud y desde $40^{\circ}48'36''\text{S}$ hasta $40^{\circ}48'27''\text{S}$ en latitud, la misma tiene una configuración rectangular con orientación suroeste-noreste.



Figura 4. Ubicación del área de estudio (recuadro rojo) sobre el este de la bahía San Antonio Este, Provincia de Río Negro.

3.2 Marco geológico

El área de estudio se encuentra dentro de la provincia geológica Macizo Nordpatagónico, definida por Harrington (1962). El desarrollo de esta región abarca desde comienzos del Precámbrico tardío-Cámbrico, y en la misma son dominantes eventos ígneos y metamórficos del Eopaleozoico y del Neopaleozoico-Triásico. Sobre la porción noreste de esta provincia

geológica, al este de la Provincia de Río Negro, afloran rocas principalmente de edad cuaternaria, aunque también se encuentran unidades más antiguas correspondientes al basamento (Fig. 5).

En el golfo San Matías las unidades más antiguas descritas datan del Carbonífero Superior-Triásico Inferior, estas corresponden a los granitos de grano fino a mediano, pórfidos graníticos y granitos con cataclasis del Complejo Plutónico Pailemán, el cual fue definido por Giacosa (1993). Estas rocas ígneas están compuestas por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita, en menor proporción se hallan apatita, circón y minerales opacos (Martínez *et al.*, 2001).

En la región de la bahía San Antonio Este, el Complejo Plutónico Pailemán es seguido por la Fm. Gran Bajo del Gualicho (Oligoceno-Mioceno Temprano), unidad definida por Lizuain y Sepúlveda (1978). Esta formación está conformada casi en su totalidad por material arcillo-arenoso, contiene en menor proporción arcilitas, arcilitas areno-margosas, calcoarenosas, areniscas de grano medio a fino, areniscas coquinoideas, arcillosas y calcáreas, también se destaca la presencia de material tobáceo y niveles de yeso (Martínez *et al.*, 2001). En esta unidad Malumián *et al.* (1984) determinaron la presencia de foraminíferos de la asociación *Criobrotalia hornibrooki*.

En forma discordante a la Fm. Gran Bajo del Gualicho se encuentran las areniscas de grano medio a fino de la Fm. Río Negro (Plioceno) (Roth, 1899), una unidad de origen fluvial con fragmentos fósiles de *Mesotheridae (Notoungulata)* determinados por Lizuain (1983).

Suprayaciendo en discordancia erosiva a las areniscas de la Fm. Río Negro le siguen los Rodados Patagónicos de origen fluvial, cuya edad se atribuye al Plioceno Superior-Pleistoceno (Martínez *et al.*, 2001). Estos espesores de roca están constituidos por conglomerados polimícticos, clasto sostén, de matriz arenosa, intercalados con lentes de areniscas (Fidalgo y Riggi, 1970).

En la costa de la bahía San Antonio Este, aflora con menor preponderancia la Fm. Baliza San Matías (Pleistoceno Inferior-Medio?), unidad definida por Angulo *et al.* (1978), que se encuentra en discordancia erosiva por encima de la Fm. Gran Bajo del Gualicho y está constituida por conglomerados de matriz arenosa, cuyos clastos son de cantos rodados y valvas (*Ostrea spp.*) y cemento de composición calcárea (Martínez *et al.*, 2001).

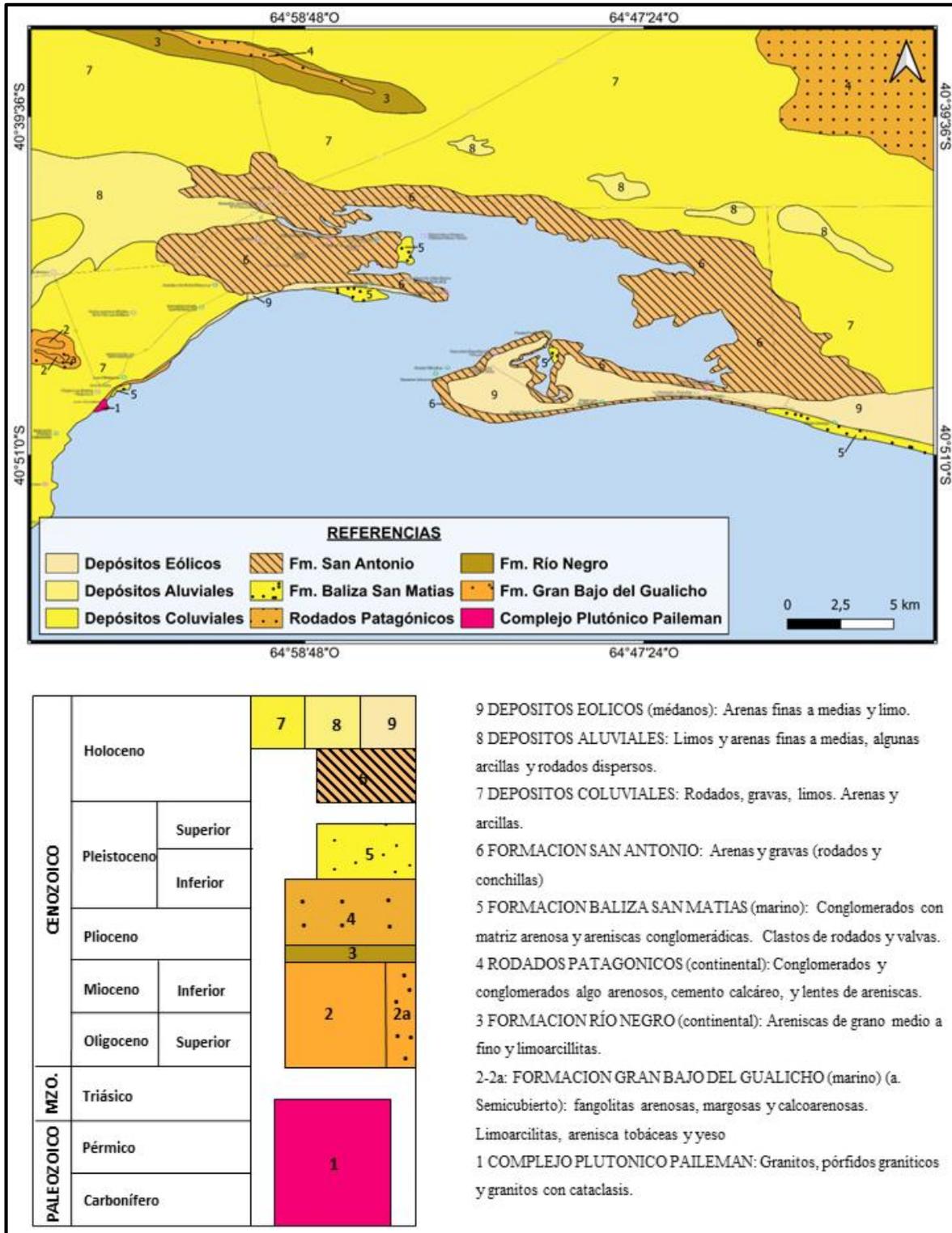


Figura 5. Mapa geológico y columna estratigráfica simplificada de la bahía San Antonio Este (extraído y modificado de Martínez et al., 2001).

Por encima, en discordancia erosiva con la Fm. Baliza San Matías, se encuentra la Fm. San Antonio (Angulo *et al.*, 1978). Estos depósitos de cordones costaneros están compuestos principalmente por gravas arenosas, con clastos de rodados y conchillas, y se encuentran cubiertos por sedimentos eólicos (Martínez *et al.*, 2001). Porro y Fidalgo (1982) asignaron a esta unidad al Holoceno. Sobre la cubierta sedimentaria de dicha unidad, se encuentran las matas microbianas que son objeto de estudio de este trabajo.

Al pie de las pendientes generadas en la zona, se desarrollan depósitos coluviales constituidos principalmente por clastos de los Rodados Patagónicos, junto con material pelítico y arenoso de unidades infrayacentes. En la misma zona, se acumulan depósitos aluviales, principalmente en quebradas y en los fondos de los bajos, conformados mayormente por limos y arcillas (Martínez *et al.*, 2001).

En la región de la bahía, actualmente se depositan arenas finas y material limoso, correspondientes a depósitos de origen eólico, formando mantos de arena o médanos embrionarios, principalmente de tipo barjanoide y longitudinal (Martínez *et al.*, 2001). Toffani *et al.* (2024), clasificaron a los médanos del área como oblicuos a transversales, los cuales se encuentran fijos debido a que la vegetación coloniza las áreas de deslizamiento de dichos médanos.

3.3 Geomorfología

En la topografía patagónica, es común la existencia de relieves deprimidos, y cuando estos están cerca de la línea de costa, el aumento del nivel del mar puede resultar en su inundación (Kokot y Favier-Dubois, 2017).

En el sector norte del golfo San Matías, cerca de la costa, se encuentra el bajo San Antonio, el cual da origen a la bahía homónima. Según Kokot y Favier-Dubois (2017), la formación de la bahía está vinculada a las variaciones del nivel del mar durante el periodo Cuaternario, donde la erosión costera provocó la ruptura de la barrera que separaba el bajo del golfo.

El desarrollo de la bahía San Antonio Este comenzó con una primera inundación ocurrida en el Pleistoceno Temprano-Medio, cuando la ingresión marina ocupó completamente el bajo. Posteriormente, como resultado del máximo glaciar del Pleistoceno Tardío, se produjo una significativa regresión marina. En el Holoceno, se registró nuevamente una transgresión

marina que inundó parte del bajo. Con el tiempo y la acción de las mareas, el área se fue moldeando hasta adquirir la configuración actual (Kokot y Favier-Dubois, 2017).

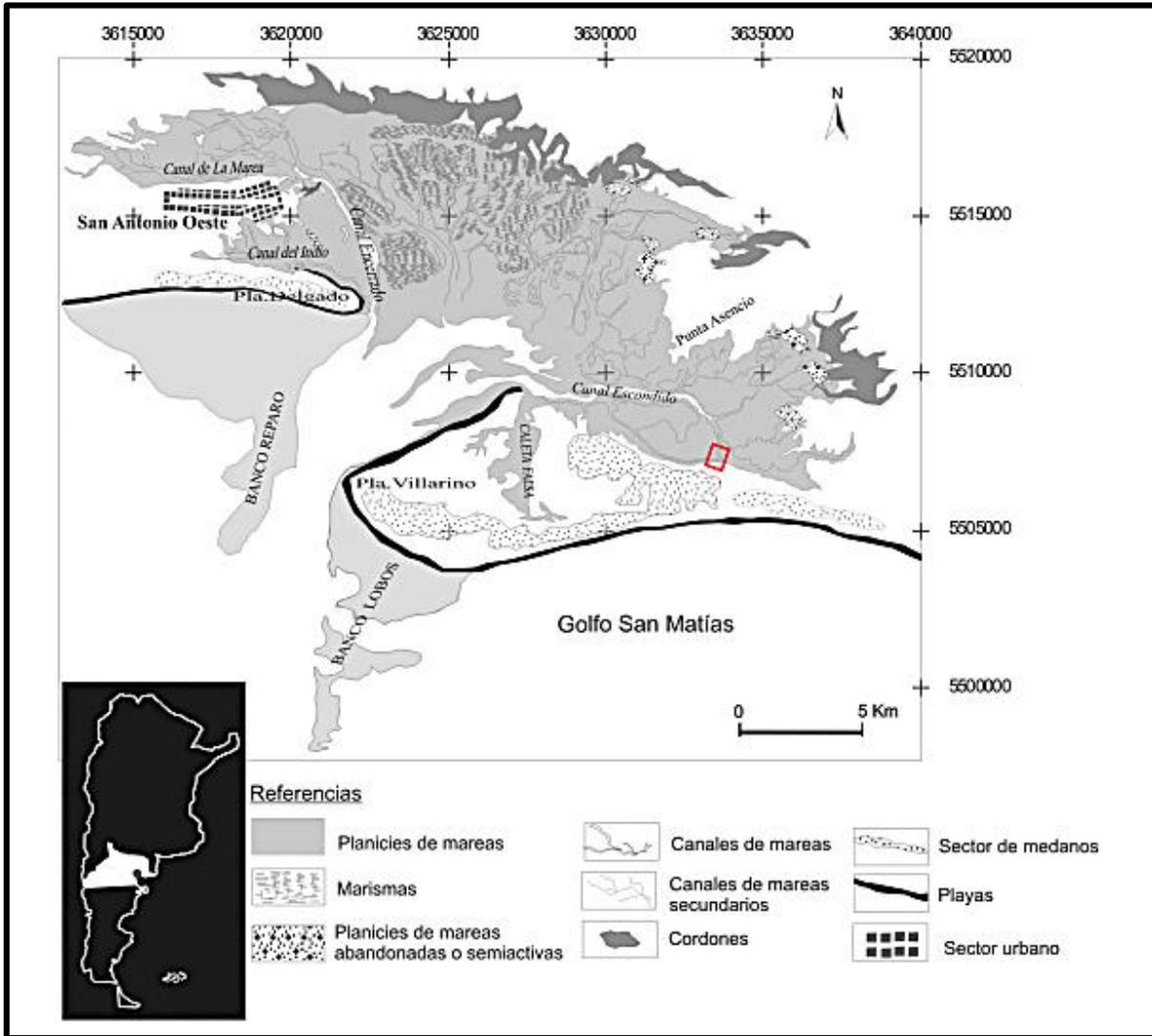


Figura 6. Mapa geomorfológico de la bahía San Antonio Este. Recuadro rojo indica ubicación aproximada del área de trabajo mostrada en la Figura 7 (extraído de Carbone et al., 2007).

3.3.1 Bahía

La bahía San Antonio Este (Fig. 6), de forma semicircular, cubre una superficie de 160 km², tiene una abertura que conecta la bahía con el norte del golfo San Matías de

aproximadamente 5 km y está delimitada por dos espigas (Carbone *et al.*, 2007; Fucks *et al.*, 2012).

3.3.2 Espigas

En la bahía se desarrolla la espiga Punta Delgado (Fig. 6), con un área de 1,4 km de ancho y 5 km de longitud, tiene forma lobulada y se halla orientada hacia el este. Esta espiga está compuesta principalmente por conchillas y rodados, intercalados con niveles de arcillas y en gran parte cubierta por médanos. Por otro lado, la espiga de mayor tamaño es la denominada Punta Villarino (Fig. 6), con una extensión de 4 km de ancho y 15 km de longitud. Se encuentra orientada hacia el oeste, tiene una forma recurvada y está compuesta por arena media y grava (Carbone *et al.*, 2007; Kokot y Favier-Dubois, 2017).

3.3.3 Llanura de marea y marisma

La zona interna de la bahía que conforma la llanura mareal de baja pendiente está constituida principalmente de material arcillolimoso, con presencia de arenas y rodados de hasta 2 cm de diámetro que provienen de las áreas elevadas. En la porción noreste de la bahía, se desarrollan marismas compuestas por arenas intermedias y finas muy influenciadas por la acción de las mareas, estas se encuentran colonizadas por especies vegetales de *Spartina* y *Salicornias* (Carbone *et al.*, 2007).

3.3.4 Canales de marea

El flujo de las aguas marinas que inundan la zona está influenciado por el canal principal, el que tiene una longitud de 12 km y una profundidad máxima de 35 m. Este canal da origen a varios canales de mareas secundarios con un patrón de diseño dendrítico (Carbone *et al.*, 2007; Kokot y Favier-Dubois, 2017).

En la parte occidental de la bahía, específicamente al norte de la localidad de San Antonio Oeste, se ubica el canal de La Marea (Fig. 6), con una orientación este-oeste, su longitud es de 4 km y alcanza una profundidad máxima de 0,9 m. Al sur de la misma localidad, se extiende el canal El Indio (Fig. 6), también con orientación este-oeste, con una longitud de 2 km y una profundidad máxima de 0,8 m. Al este de la localidad costera, con orientación sur-norte, se encuentra el canal Encerrado (Fig.6), que abarca 7 km de longitud y tiene una profundidad máxima de 1,2 m (Carbone *et al.*, 2007).

En el sector oriental de la bahía, se localiza el canal Escondido (Fig. 6), con una longitud de 5,5 km, dirección este-oeste y una profundidad máxima de 0,90 m. Este canal desempeña un papel crucial al alimentar a canales de menor jerarquía (arroyos de mareas), cuyos desarrollos están condicionados por la acción de las mareas (Carbone *et al.*, 2007).

3.3.5 Cordones litorales

En el sector noreste de la bahía, aledaño a las planicies de mareas, se encuentran depósitos de cordones litorales, constituidos principalmente por gravas arenosas con valvas. Los rodados alcanzan diámetros de 3 cm y son muy redondeados. Según donde se encuentren estas geoformas pueden alcanzar alturas de hasta 2 m, principalmente en el norte de la bahía. En otras zonas, como los encontrados en el este, los cordones no superan el metro de altura (Carbone *et al.*, 2007).

3.3.6 Médanos

Los médanos abarcan una extensa porción de la bahía, concentrándose principalmente en la región sureste, en Punta Villarino, donde aproximadamente el 70% del área está cubierta por médanos (Fig. 6). En menor medida, se extienden en las proximidades de Punta Delgado, donde la amplitud de la zona ocupada por estos no supera los 2 km (Carbone *et al.*, 2007).

Los médanos alcanzan una altura máxima cercana a los 10 m y generalmente se disponen de manera paralela a la costa de la bahía. Se desarrollan geoformas del tipo barjanoide y oblicuas a transversales, siendo estas últimas las más abundantes. Algunas de ellas están estabilizadas por la vegetación que coloniza las superficies de deslizamientos, mientras que otras permanecen activas, desplazándose en direcciones diversas debido a los vientos que se desarrollan en múltiples direcciones (Fucks *et al.*, 2012; Kokot y Favier-Dubois, 2017; Toffani *et al.*, 2024).

3.4 Mareas

En la bahía San Antonio Este, la planicie de marea silicoclástica experimenta cambios diarios en el nivel del mar debido a las características macromareales presentes en la región.

La clasificación de la marea se define como semidiurna, considerando la frecuencia de las pleamares y las bajamares, y como macromareal (amplitud superior a 4 m), según la clasificación de marea propuesta por Davies (1964), con una amplitud media de 7,96 m en el

año 2023, según el Servicio de Hidrografía Naval (SHN). La amplitud máxima de marea en la zona alcanza los 9,26 m, con una media de 6,30 m según la tabla de mareas del mes de noviembre del año 2023 del SHN (Tabla 1). Estas condiciones mareales influyen en la dinámica del área, y su comprensión es esencial para analizar la interacción de las estructuras sedimentarias con el entorno circundante.

Alturas en metros correspondientes a la predicción 2023					
Pleamar			Bajamar		
Máxima	Promedio		Más baja	Promedio	
9,53	7,96		0,15	1,66	
Predicciones mes Noviembre					
Día	Hora : Min	Altura (m)	Día	Hora : Min	Altura (m)
24	02:36	1,80	25	03:38	1,50
	09:04	7,72		10:04	8,07
	15:01	1,53		16:01	1,37

Tabla 2. Tabla de marea del mes de noviembre, año 2023. Muelle de Ultramar, Puerto San Antonio. En recuadro amarillo se denota hora y altura de la marea alta apreciada en el actual trabajo (construida con datos obtenidos del Servicio Hidrográfico Naval, 2024).

La variación en el nivel del mar conlleva a que la bahía de San Antonio Este y las costas adyacentes se inunden dos veces al día. Durante los períodos de refluo, aproximadamente el 85% de la superficie interna de la bahía queda al descubierto, dejando agua solo en estrechos canales de poca profundidad y pozos de marea. Esta exposición constante a los elementos resulta en una significativa irradiación solar, especialmente en verano, sobre las llanuras intermareales y cuerpos de agua, provocando un aumento notable en la temperatura (Fucks *et al.*, 2012).

4 MATERIALES Y MÉTODOS

En la ejecución de este trabajo, se realizó en primera instancia, una labor previa de recopilación y lectura bibliográfica sobre la temática principal y el área de estudio, incluyendo libros, tesis doctorales, artículos académicos y la hoja geológica 38j desarrollada por Lizuain en 1983.

Durante los días 24 y 25 de noviembre de 2023 se llevó a cabo una campaña, donde se recorrió la planicie de marea ubicada al este de la bahía San Antonio Este y se determinó con mayor exactitud el área de trabajo, ubicándola en la zona de la planicie de marea con mayor contenido de estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana, lo que conllevó a realizar una modificación en las coordenadas geográficas definidas en el plan de trabajo inicial y reducción del área de estudio.

La elección de estas fechas fue estratégica, ya que en base a la tabla de mareas pronosticadas del SHN se permitió explorar las máximas fluctuaciones del nivel del mar, y así poder observar el área afectada en dos momentos fundamentales: durante la bajamar, ocurrida el día 24 a las 15:01 h, y durante la pleamar, que tuvo lugar el día 25 a las 10:04 h. Aunque no fue posible presenciar el alcance de la marea durante la sicigia debido a la fecha de suceso del fenómeno, la observación del alcance de la marea alta se realizó un día antes de la ocurrencia de la marea viva, por lo que el alcance observado fue cercano al que ocurre cuando la marea alcanza su altura máxima.

Durante estas salidas de campo, se llevaron a cabo observaciones detalladas y se documentaron de cerca las ESIAM identificadas mediante una cámara fotográfica Nikon P510. Se utilizó un dron DJI Mini 3 Pro para obtener una perspectiva de mayor altura y generar imágenes aéreas que permitieron realizar un mapa detallado del área de estudio, indicando la distribución de las distintas ESIAM. Dicho mapa se realizó con el software de sistema de información geográfica de uso libre, QGIS 3.32.3.

Por último, se realizó una comparación entre las ESIAM halladas en la planicie de marea actual, con ESIAM fósiles descritas en la bibliografía para ambientes similares.

5 RESULTADOS

El área de estudio se divide en tres sectores claramente diferenciados, influenciados por factores hidrodinámicos y ambientales, que comprenden las zonas intermareal y supramareal (Fig. 7).

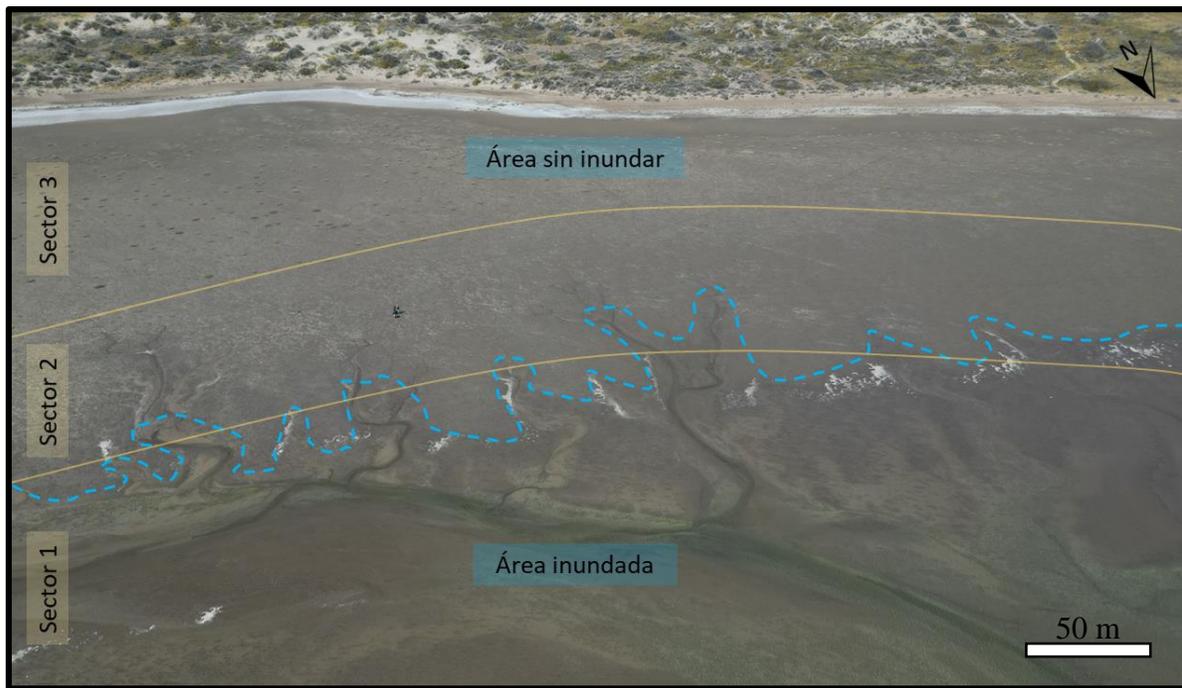


Figura 7. Fotografía aérea de la planicie mareal, parcialmente inundada. Líneas punteadas azules muestran el alcance de la marea durante la pleamar el 25 de noviembre de 2023. Líneas amarillas dividen la planicie de marea en distintos sectores según factores hidrodinámicos y ambientales.

En la Figura 7 se muestra una fotografía aérea captada el 25 de noviembre a las 10:04 h, que revela el alcance de la inundación provocada por la marea en ese momento (ver Tabla 1). Esta marea cubrió una parte significativa de la zona intermareal, afectando los sectores 1 y 2 del área de trabajo, con un nivel del mar registrado de 8,07 m. El alto nivel que alcanza la marea es debido a la cercanía del evento de sicigia, cuya fecha de ocurrencia era dos días después, lo que llevó a un incremento adicional de 0,96 m, en el cual el nivel del mar alcanzó una altura de 9,03 m.



Figura 8. Fotografía aérea del sector 1, abarcando una parte de la zona intermareal, mostrando la red de arroyos de marea con morfologías sinuosas y ramificadas que evidencian la baja pendiente de la planicie de marea.

El sector 1, corresponde al norte del área de trabajo, superficie de la planicie de marea colonizada por matas microbianas en la cual predominan los arroyos de marea (Fig. 8). Estos arroyos se originan desde el canal principal llamado canal Escondido.

El sector 1, el cual corresponde a la zona intermareal, presenta el mayor contenido de humedad debido a la frecuente inundación por las mareas.



Figura 9. Fotografía aérea del sector 2, abarcando una parte de la zona intermareal, con los últimos tramos de los arroyos de marea, destacando la diferencia de color (línea

punteada curva amarilla), debido al contenido de humedad, entre el área intermareal alcanzada por los arroyos y el área que no es alcanzada por los mismos.

Hacia el sur del sector 1, se encuentra el sector 2, área de la planicie donde se ve disminuido el alcance e influencia de los arroyos de marea (Fig. 9). Este sector mantiene un alto contenido de humedad, atribuible a la proximidad del agua freática a la superficie durante los periodos de mareas altas, aunque menor que en el sector 1.

El sector 2 se encuentra en la zona intermareal, donde las condiciones de humedad son altas, pero no tan constantes como en el área inmediatamente cercana a los arroyos de marea.



*Figura 10. Fotografía aérea del sector 3, abarcando una parte de la zona supramareal, colonizado por matas microbianas y plantas *Sarcocornia perennis* (recuadro rojo), mostrando su distribución y la estructura de la vegetación.*

El sector 3, ubicado en la porción sur en el área de trabajo, se caracteriza por la ausencia de arroyos de marea y una notable pérdida superficial de humedad, acompañada de un aumento en la costra salina (Fig. 10).

El sector 3 muestra una abundante presencia de plantas de la especie *Sarcocornia perennis*, cuya densidad aumenta al acercarse a la zona de médanos vegetados (Fig. 10). La disminución de humedad en este sector se debe a la menor frecuencia de inundación. Esta área corresponde a la zona supramareal y se encuentra en contacto con los médanos vegetados del sur, marcando la transición hacia un ambiente continental.

5.1 ESIAM identificadas

5.1.1 Domos de gas

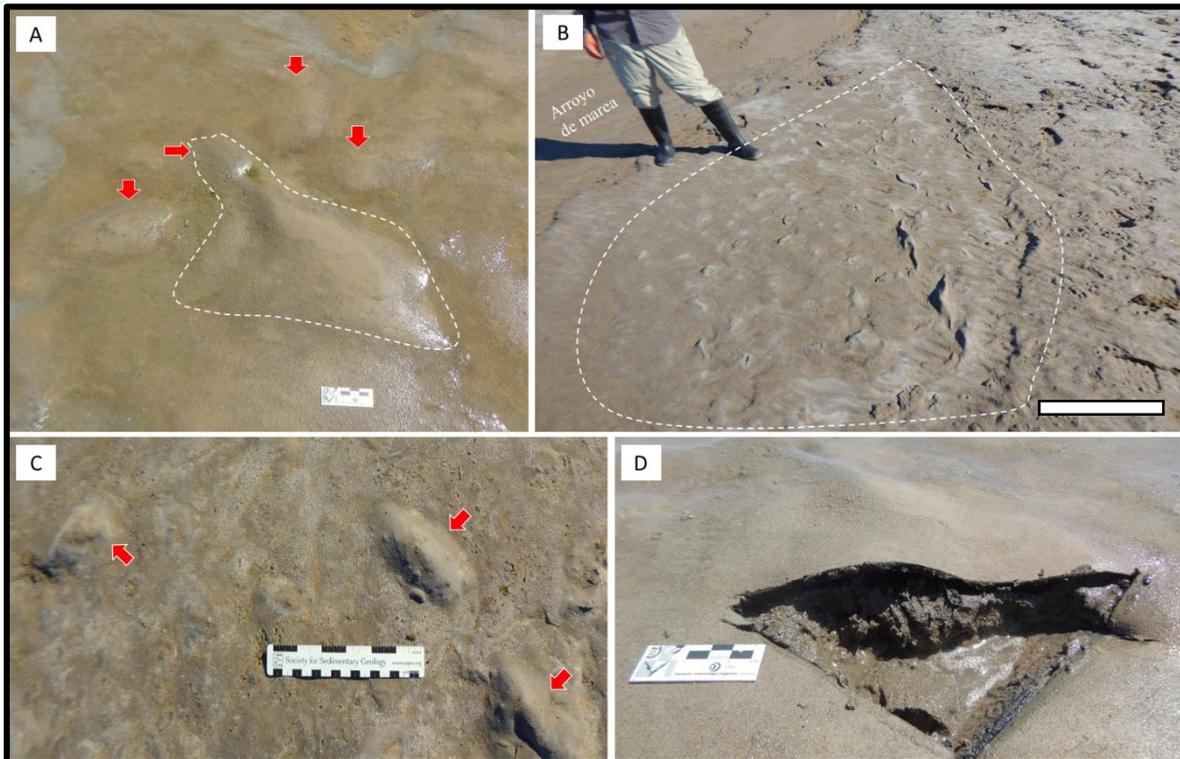


Figura 11. Fotografías de los domos de gas, indicados con flechas rojas y líneas punteadas blancas. A) Domos elípticos hallados en proximidades de los canales de mareas. En líneas punteadas, se observa un domo con morfología irregular (graduación inferior de la escala: 3 cm). B) Acumulaciones de varios domos de gas (líneas punteadas blancas) en cercanía a un arroyo de marea (escala: 40 cm). C) Domos de gas elípticos en zonas alejadas a los arroyos de marea (graduación inferior de la escala: 15 cm). D) Corte transversal de un domo de gas. Se aprecia el espacio que se genera entre la mata microbiana y el sedimento subyacente (graduación inferior de la escala: 3 cm).

Una de las estructuras de mayor abundancia en el área de estudio y de fácil observación son los domos de gas. Estas estructuras, con formas de domo, poseen distintas expresiones dependiendo del lugar donde se encuentran.

Los domos de gas hallados en los arroyos de mareas o en depresiones cercanas a ellos, poseían un predominio de forma elíptica, con un eje mayor de aproximadamente 10 a 12 cm, un eje menor que varía entre 6 a 8 cm y las cúpulas de estas estructuras tenían una altura entre 5 a 7 cm (Fig. 11A, flechas rojas). Además, en este sector fue recurrente encontrar dos

o más domos fusionados, dando lugar a estructuras de morfología irregular que alcanzaban longitudes de hasta 30 cm y una altura de alrededor de 10 cm (Fig. 11A, líneas punteadas).

En los arroyos de mareas y áreas cercanas, la cantidad de domos observados fue considerablemente mayor (Fig. 11B). Por otro lado, las estructuras encontradas en depresiones aisladas, en zonas alejadas a los canales de mareas pero que ocasionalmente se inundaban, presentaban una forma elíptica con un eje mayor de aproximadamente 8 cm y un eje menor de alrededor de 5 cm, y 2 a 3 cm de altura (Fig. 11C).

Al realizarse un corte transversal a una de las estructuras (Fig. 11D), se observó un espacio entre el sedimento y la mata microbiana suprayacente, siendo ésta la zona desarrollada por la acumulación de gas, la cual da origen a la elevación por encima de la superficie.

5.1.2 Grietas de contracción

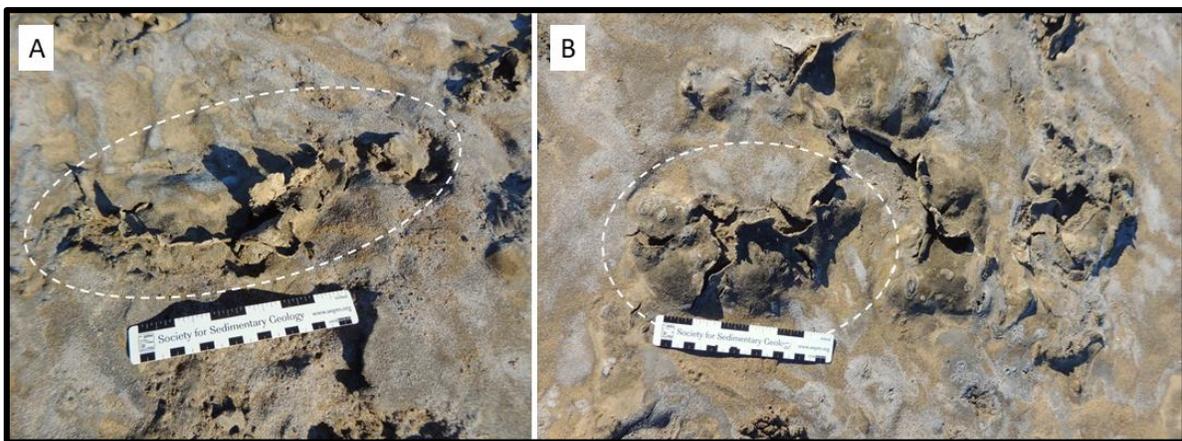


Figura 12. Fotografías de las grietas de contracción en la planicie de marea, indicadas con líneas punteadas blancas. A) Grieta de borde irregular (largo total de la escala: 15 cm). B) Grieta del tipo triple unión sobre un domo de gas (largo total de la escala: 15 cm).

En las áreas donde las inundaciones ocurrían con menor frecuencia, se encontraron grietas de contracción. Estas ESIAM halladas en la zona supramareal de la planicie presentaban bordes irregulares, con una apertura de grieta de hasta 3 cm de ancho y una longitud que no superaba los 40 cm (Fig. 12A).

En las grietas de contracción más antiguas, se observó una curvatura pronunciada hacia arriba del margen agrietado, el cual podía alcanzar alturas de 2 cm y no completaba media vuelta de curvado, mientras que en las grietas más recientes este enrollamiento era menos pronunciado, alcanzando alturas menores a 1 cm.

Otro tipo de grietas identificadas en el área de estudio, en cercanía a los canales de mareas que alcanzaban las áreas superiores de la zona intermareal, son las grietas en forma de triple unión (Fig. 12B), la cuales se desarrolla sobre las cúpulas de los domos de gas y están conformadas por tres márgenes agrietados que convergen en un punto en común. La longitud de estas grietas, en la mayoría de los casos, estaba limitada por el diámetro de los domos, y sus márgenes presentaban una forma irregular con un ligero enrollamiento hacia arriba en los bordes.

5.1.3 Enrollamientos

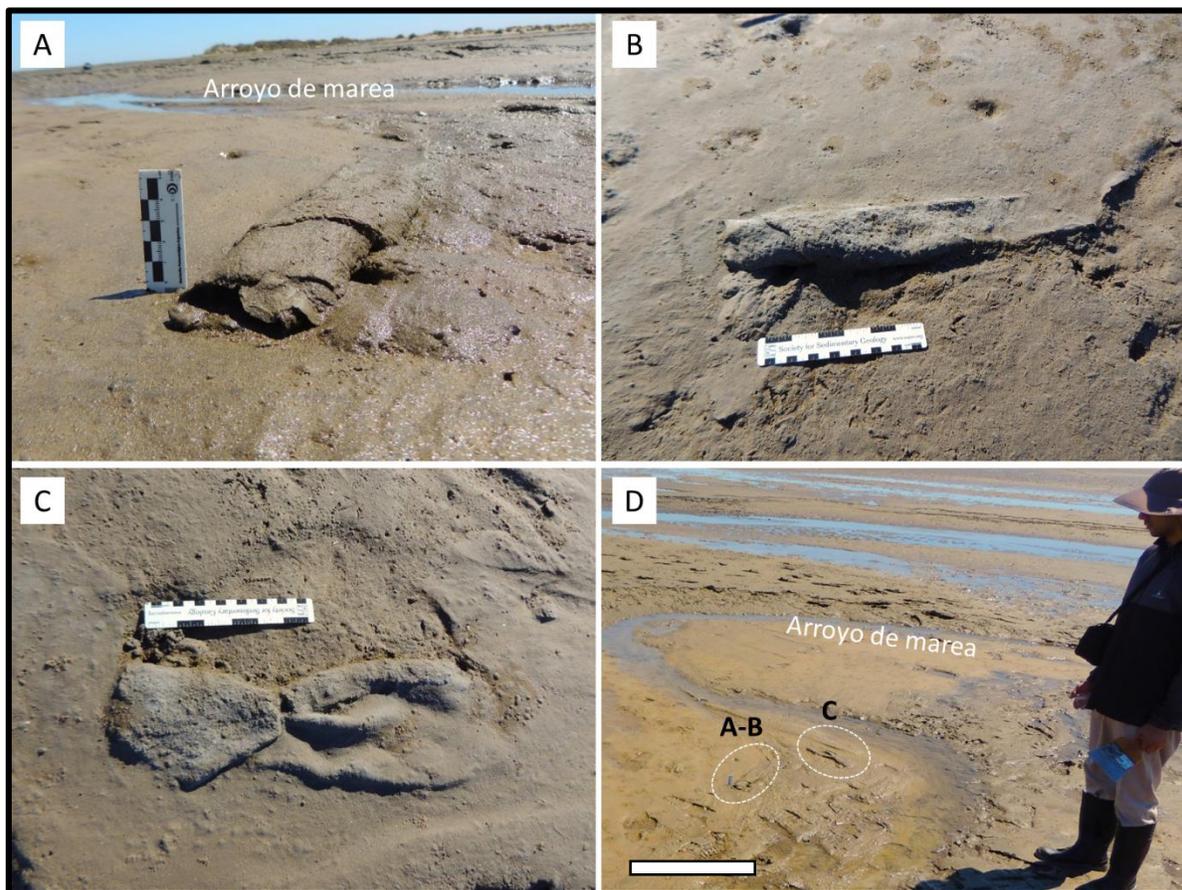


Figura 13. Fotografías de enrollamientos en arroyos de mareas. A) Enrollamiento con más de 3 vueltas, vista frontal (largo total de la escala: 5 cm). B) Vista en planta del enrollamiento (largo total de la escala: 15 cm). C) Vista en planta de enrollamiento con una vuelta (largo total de la escala: 15 cm). D) Enrollamientos (líneas punteadas) en una zona saturada de agua en el arroyo de marea. Letras A, B y C indican ubicación de cada enrollamiento fotografiado individualmente (escala: 50 cm).

Se identificaron estructuras menos comunes que presentaban un desarrollo más complejo. Estas consistían en capas de mata microbiana y material silicoclástico enrolladas en múltiples vueltas, formando una configuración similar a una alfombra enrollada.

En la Figura 13A y B, se muestra una estructura de enrollamiento en vistas lateral y superior, donde se observa que la misma estaba conformada por una lámina de 5 mm de espesor enrollada en al menos tres vueltas, con una altura de 3 cm y una longitud de 25 cm. En la figura 13B, se aprecia que la lámina exhibe un enrollamiento cónico, resultando en un mayor espesor en uno de sus extremos.

Además, se encontraron estructuras con un enrollamiento que implicaba menos vueltas, alcanzando una altura inferior a 2 cm y una longitud de aproximadamente 22 cm (Fig. 13C). Estas ESIAM se hallaron en los arroyos de mareas y estaban próximas entre sí (Fig. 13D).

En la Figura 13D se aprecia que la dirección de enrollamiento de la mata es perpendicular a la dirección del arroyo más cercano, originando que las dos estructuras observadas, a pesar de estar muy próximas entre sí, desarrollen enrollamientos con direcciones distintas.

5.1.4 Fragmentos de matas

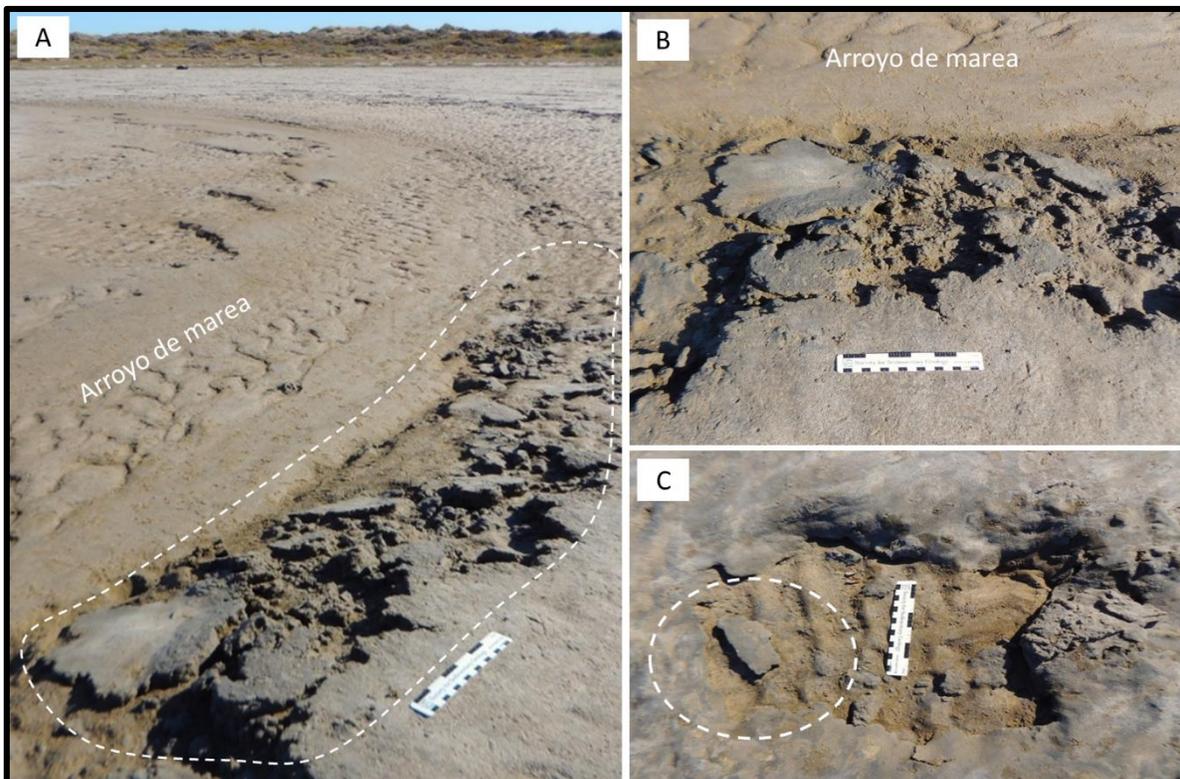


Figura 14. Fotografías de fragmentos de matas en la zona intermareal. A) Fragmentos de matas irregulares sobre el borde del arroyo de marea (largo total de la escala: 15 cm). B) Vista ampliada del borde del arroyo de marea donde se halla el conjunto de fragmentos (largo total de la escala: 15 cm). C) Fragmentos de matas (círculo punteado blanco) asociadas a un bolsillo de erosión (largo total de la escala: 15 cm).

Otra ESIAM comúnmente encontrada en la zona intermareal, asociada mayormente a los arroyos de mareas, corresponde a los llamados fragmentos de matas (Fig. 14A, B y C). Estas estructuras consisten, como su nombre lo indica, en porciones o fragmentos de matas que han sido erosionadas y desprendidas de la superficie de matas microbianas.

En las Figuras 14A y B (en B, fotografía ampliada de la misma área que en A), se observan fragmentos de varios tamaños cerca del borde de un arroyo de marea. Los fragmentos más grandes alcanzaban hasta 25 cm de longitud, mientras que los más pequeños rondaban los 2 cm, todos estos con bordes irregulares.

En áreas alejadas de los arroyos de marea, se encontraron también algunos fragmentos de matas, pero asociados a bolsillos de erosión (Fig. 14C). En este caso, la estructura presentaba bordes rectos, pudiéndose correlacionar con el borde del remanente, cuya longitud era de aproximadamente 9 cm y un ancho cercano a los 4 cm. Además, en el mismo bolsillo de erosión se observaron fragmentos más pequeños, que no superaban los 2 cm de longitud.

5.1.5 Bolsillos de erosión y remanentes de matas

En el área de estudio, se identificaron estructuras del tipo bolsillos de erosión y remanentes de mata. Los bolsillos se caracterizan por ser depresiones alargadas de formas y bordes irregulares, cuyo cambio de relieve puede ser brusco o suave. Los remanentes, por otro lado, representaban las áreas de la superficie cubiertas por matas microbianas que rodean a los bolsillos de erosión.

Se observaron en menor cantidad bolsillos de erosión cercanos a un arroyo de marea, con una longitud de 1,3 m y un ancho aproximado de 60 cm (Fig. 15A). Estas estructuras presentaban cambios de pendientes abruptos en sus bordes y mostraban la formación de ondulitas en su interior, sobre el sedimento subyacente. Alrededor de estos bolsillos se encontraban los remanentes de matas correspondientes.



Figura 15. Fotografías de bolsillos de erosión (BE) y remanentes de matas (R) en la zona intermareal. A) Bolsillos de erosión asociados a un arroyo de marea (escala: 40 cm). B) Zona intermareal de la planicie mareal cubierta casi en su totalidad por bolsillos de erosión y remanentes de matas (escala: 50 cm). C) Bolsillo de erosión con ondulitas en su interior (largo total de la escala: 15 cm).

Por otro lado, se observaron numerosos bolsillos de erosión y remanentes de matas en la zona intermareal, las cuales no se encontraban asociadas a un arroyo de marea, como se muestra en la figura 15B. Un ejemplo de estas estructuras, se presenta en la figura 15C, esta depresión con una longitud de 1,2 m y un ancho de 40 cm, mostraba bordes moderados e irregulares. En su interior, se podían apreciar las características ondulitas sobre el sedimento que quedó expuesto luego de ser erosionada la mata. Alrededor de la depresión se encontraban los remanentes de matas sin erosionar.

5.2 Distribución de las ESIAM en la planicie de marea

En el área de estudio se identificaron un total de cinco tipos de estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana: domos de gas, grietas de contracción, enrollamientos, fragmentos de matas y bolsillos de erosión y remanentes de matas.

La mayoría de las estructuras halladas en el área de estudio se distribuyen en la zona intermareal, especialmente en áreas asociadas a los arroyos de marea, y en menor medida en la zona supramareal, esta última zona se encuentra identificada por la presencia de las plantas *Sarcocornia perennis* (Fig. 16).

Se observó que las zonas cercanas a los cuerpos de agua, caracterizadas por una elevada humedad, presentan una mayor cantidad y diversidad de estructuras. En la zona intermareal, los arroyos de marea influyen significativamente en la distribución de las ESIAM, facilitando la formación de domos de gas y fragmentos de mata. La zona supramareal, en cambio, presenta menor cantidad y variedad de estructuras, debido a la disminución de la humedad que caracteriza a esta zona.

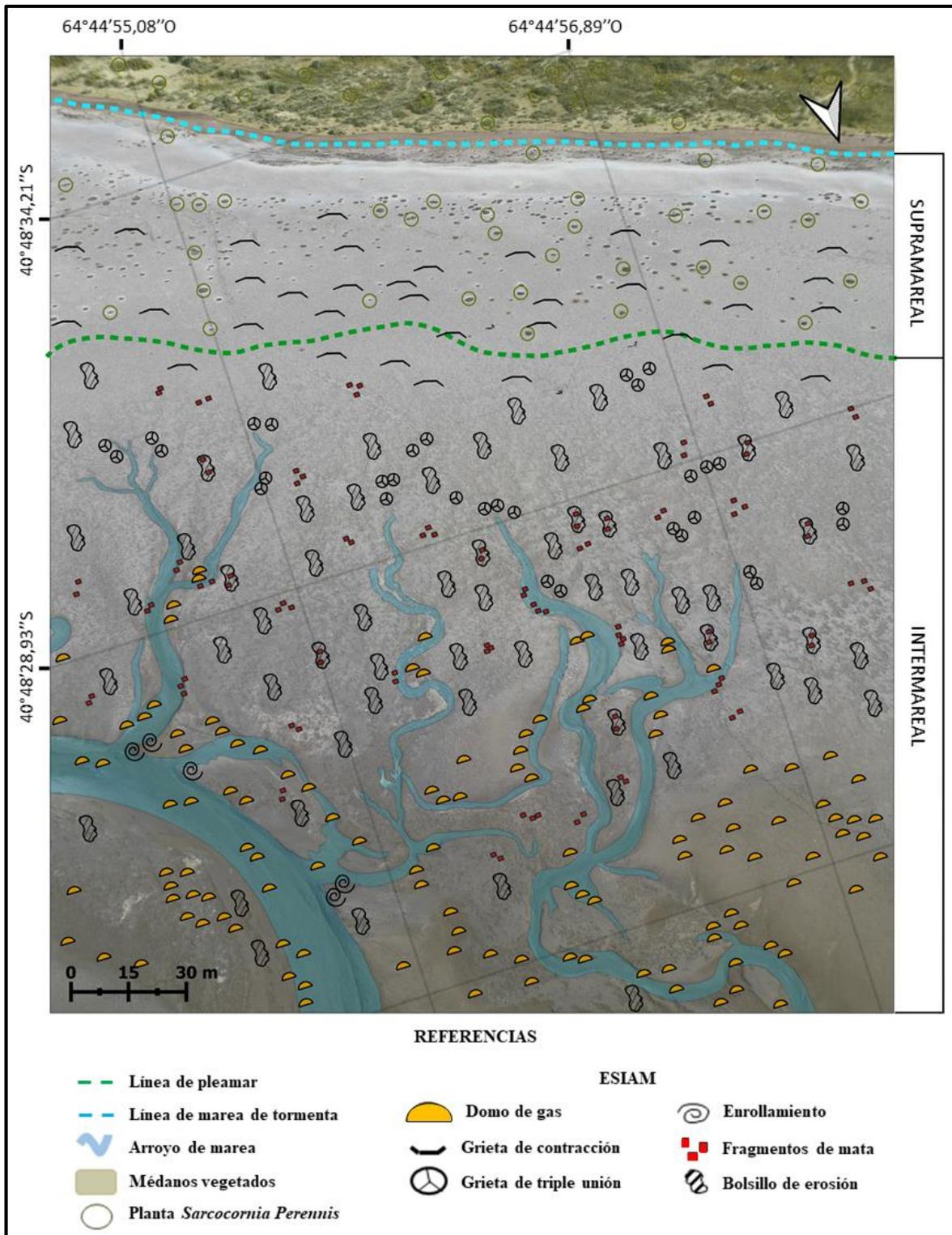


Figura 16. Mapa del área de estudio con la distribución de las distintas ESIAM halladas en las diferentes zonas de la planicie de marea.

6 DISCUSIÓN

En el presente trabajo, se identificaron y caracterizaron cinco estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana en las zonas intermareal y supramareal de la planicie de marea ubicada en el este de la bahía San Antonio Este (Fig. 4). Estas estructuras presentan una variedad de formas y distribuciones que están influenciadas por los procesos y las condiciones imperantes en el ambiente. Su diversidad y distribución sugieren una compleja interacción entre la actividad biológica, la hidrodinámica y otros factores ambientales (Gerdes *et al.*, 1991, 1993).

La bioestabilización de los sedimentos en la planicie de marea desempeña un papel crucial en la reducción de su susceptibilidad a la erosión. Este proceso confiere flexibilidad a la capa superficial integrada por sedimentos y microorganismos. Además, la humedad aumenta esta flexibilidad, mientras que la sequedad la reduce, lo que a su vez afecta a los sedimentos, reduciendo la resistencia de éstos a los procesos erosivos (Gerdes *et al.*, 2000).

6.1 Desarrollo de las ESIAM

6.1.1 Distribución y génesis de los domos de gas

Los domos de gas son las estructuras más abundantes y fácilmente reconocibles en el área de estudio. Estas ESIAM son causadas por procesos de bioestabilización, y están asociadas principalmente a las zonas de la planicie que permanecen inundadas durante períodos largos de tiempo, como los arroyos de mareas y depresiones generalmente asociadas a estos que permanecen inundadas cuando la línea de costa retrocede (Fig. 11). El desarrollo de estos domos en las zonas intermareales se atribuye principalmente a la actividad microbiana y su interacción con el agua subyacente (Gerdes *et al.*, 1993; Noffke, 2010; Maisano, 2019).

La formación de los domos ocurre cuando el aire intersedimentario es desplazado hacia arriba, por el ascenso del agua freática durante las inundaciones, a través de microcanales formados por la interconexión de los espacios porales (Noffke *et al.*, 2001; Maisano, 2019). La mata microbiana, contiene una gran cantidad de sustancias poliméricas extracelulares producida por los propios microorganismos, que le otorgan una propiedad impermeabilizante y adquieren una notable flexibilidad al humedecerse. Cuando se produce el ascenso del aire, al no poder llegar hasta la superficie, se genera la separación entre la mata microbiana y el

sedimento subyacente, deformando la capa superficial y formando así el domo microbiano (Gerdes *et al.*, 1993; Noffke *et al.*, 2001; Noffke, 2010; Maisano, 2019).

La descomposición de la materia orgánica acumulada en los sedimentos subyacentes es la principal fuente generadora de los gases que se acumulan en las cavidades de los domos microbianos. Análisis cromatográficos de estos gases han revelado la presencia de compuestos como el H₂S, H₂, CO, CO₂ y CH₄ (Gerdes *et al.*, 1993; Noffke, 2010).

Bose y Chafetz (2009), indicaron la correlación que existe entre el diámetro alcanzado por los domos de gas y el espesor de la mata microbiana sobre la que se desarrolla la estructura. La correlación indica que mientras mayor sea el espesor de la mata microbiana, mayor será el diámetro de la cúpula.

La observación de domos fusionados (Fig. 11B) indica una complejidad adicional en la formación de estas estructuras. En áreas donde los domos de gas se desarrollan con mayor densidad y el espesor de la mata es suficientemente grueso para permitir el desarrollo de domos de diámetros significativos, el contacto entre dos o más domos puede dar lugar a la fusión de varias cúpulas de gas. Esto resulta en la formación de morfologías alargadas e irregulares (Banerjee *et al.*, 2014).

6.1.2 Distribución y génesis de las grietas de contracción

Las grietas de contracción son una de las estructuras más frecuentes encontradas en la planicie de marea, principalmente en la zona supramareal, y en menor medida en la zona intermareal. Estas áreas de la planicie de marea permanecen la mayor parte del tiempo expuestas al aire (Fig. 12).

A diferencia de las grietas de desecación formadas en material arcilloso, las grietas de contracción son estructuras cuya formación se desarrolla en material arenoso, lo cual se atribuye completamente a la respuesta que tiene la superficie microbiana a las condiciones ambientales, especialmente a la exposición prolongada a la radiación solar durante las estaciones calurosas (Gerdes *et al.*, 1993; Noffke, 2010; Porada y Druschel, 2010; Kovalchuc *et al.*, 2017; Aref y Taj, 2018; Maisano, 2019).

Cuando la mata microbiana está expuesta a períodos prolongados de radiación solar, experimenta una pérdida de humedad y flexibilidad, lo que provoca que, al reducirse el volumen, ésta se agriete. Las grietas de contracción no siguen un patrón poligonal típico, sino que más bien se asemejan a polígonos incompletos, debido a que la profundidad de la grieta

solo alcanza la superficie colonizada por los microorganismos. Durante períodos prolongados de exposición solar pueden desarrollarse pliegues hacia arriba en los márgenes de las grietas, dejando expuesto sedimento sin colonizar (Gerdes *et al.*, 1993; Porada y Druschel, 2010; Kovalchuc *et al.*, 2017; Aref y Taj, 2018; Maisano, 2019).

Además, existe un tipo específico de grietas de contracción, conocidas como grietas de triple unión, que se desarrollan sobre una estructura microbiana previa (Fig. 12B). Estas grietas se forman sobre los domos de gas cuando la cúpula colapsa, lo que provoca que la superficie se agriete y, al perder humedad, la mata microbiana que constituía el domo se contrae, ensanchando así la grieta. Los márgenes de estas grietas también pueden desarrollar pliegues hacia arriba en respuesta a la exposición prolongada a la radiación solar. Las grietas de triple unión son comunes en áreas cercanas a los canales de mareas que alcanzan la zona intermareal, cerca del límite con la zona supramareal (Porada y Druschel, 2010; Aref y Taj, 2018).

6.1.3 Distribución y génesis de los enrollamientos

Las estructuras de enrollamiento son, en el área de estudio, las ESIAM menos frecuentes y están localizadas principalmente cerca de los arroyos de marea en la zona intermareal (Fig. 13). Estas estructuras son causadas por procesos de bioestabilización y la acción de agentes externos, como las corrientes de agua que se generan en cercanía a los arroyos cuando el nivel de la marea baja. Este efecto se intensifica durante las tormentas, cuando la velocidad de la corriente de agua se incrementa rápidamente (Bouougri y Porada, 2012; Cuadrado y Blasi, 2018; Maisano, 2019; Lakhdar *et al.*, 2020).

Al encontrarse en zonas donde la humedad prevalece, la mata microbiana adquiere mayor flexibilidad, lo que facilita el desarrollo de enrollamientos (Maisano, 2019). En los arroyos, la velocidad del agua tiene la energía suficiente para aprovechar superficies de debilidad en las matas microbianas y desprender parte de ésta. Posteriormente, la capa microbiana, junto con algo de material sedimentario, se enrolla tomando forma cilíndrica o cónica (Bouougri y Porada, 2012; Cuadrado y Blasi, 2018; Maisano, 2019).

Generalmente, los enrollamientos se desarrollan sobre superficies de desgarro, en las cuales la capa superficial de la mata microbiana se desprende de la capa subyacente y queda flotando en el agua. Estas estructuras también indican la dirección del flujo, ya que la

corriente de agua determina la dirección del enrollamiento (Cuadrado y Blasi, 2018; Maisano, 2019; Lakhdar *et al.*, 2020).

6.1.4 Distribución y génesis de los fragmentos de matas

Los fragmentos de matas son, en el área de estudio, estructuras halladas en zonas de la planicie de marea, donde los sedimentos colonizados han sido sometidos a un evento hidrodinámico con la energía suficiente para separar un fragmento de mata microbiana del resto (Fig. 14). La bioestabilización juega un rol importante, ya que la flexibilidad que le otorga a la capa, mantiene el trozo fragmentado en una sola porción y permite que ésta no sea fragmentada nuevamente con facilidad (Gerdes, 2007; Noffke, 2010; Porada y Druschel, 2010; Cuadrado y Blasi, 2018).

Los fragmentos de matas se forman debido a que el flujo de agua que se produce cuando la marea aumenta y disminuye su nivel, alcanza la suficiente energía para fragmentar parte de la capa microbiana y separarla del resto (Noffke, 2010). El evento que inicia el proceso para la generación de esta estructura se da cuando la marea sube, en esta etapa el agua se infiltra entre la capa microbiana bioestabilizada y el sedimento subyacente, produciendo que estos se distancien entre sí. Este fragmento de mata microbiana, aislado del sedimento subyacente, debido a la recurrencia del fenómeno de variación de nivel del agua, es posteriormente arrancado del remanente por la energía de la corriente de agua (Gerdes, 2007; Noffke, 2010; Maisano, 2019).

Una de las áreas donde la energía para producir la fragmentación es suficiente es en los bordes de los arroyos de marea en la zona intermareal, debido a las altas velocidades que alcanzan los flujos de agua sobre estos cauces. Estas estructuras también se pueden encontrar relacionadas con estructuras de bolsillo de erosión y remanentes de matas (Fig. 15), cuando la inundación en la planicie alcanza los bolsillos de erosión con la energía suficiente para vencer la flexibilidad de la mata, fragmenta los bordes y los deposita dentro del bolsillo erosionado o lejos del mismo (Noffke, 2010; Maisano, 2019).

La porción de mata microbiana que constituye la estructura suele quedar a la deriva durante la inundación, siendo lo más común que estas se trasladen en dirección de la corriente. Los fragmentos pueden ser un trozo de mata separada de un sector cercano, mostrando bordes rectos, como también pueden presentar bordes irregulares (Fig. 14C) (Noffke, 2010; Cuadrado y Blasi, 2018).

6.1.5 Distribución y génesis de los bolsillos de erosión y remanentes de matas

Los bolsillos de erosión y remanentes de matas son, en el área de estudio, estructuras halladas principalmente en la zona intermareal (Fig. 15). Estas ESIAM son causadas por procesos físicos que erosionan la superficie desbioestabilizada (Gerdes, 1993; Noffke, 1999; Lakhdar *et al.*, 2020).

Los bolsillos de erosión asociados a los canales de marea de la zona intermareal se forman debido a las altas velocidades que alcanzan las corrientes de agua que circulan por los arroyos de marea. Los bolsillos de erosión no directamente asociados a los arroyos de marea se generan por la acción de las corrientes de marea intensificadas durante eventos de tormentas (Noffke, 2010; Maisano, 2019).

El evento desencadenante para la formación de estas estructuras es la introducción de algún elemento, como restos de animales, sobre la superficie de la mata microbiana. Este elemento crea un área de sombra, lo cual provoca que los microorganismos fototróficos se desplacen hacia zonas con mayor incidencia de luz solar. Esta acción debilita la bioestabilización del sedimento, desbioestabilizando la superficie y reduciendo su capacidad para resistir la erosión (Gerdes, 1993; Noffke, 1999, 2010). En las áreas donde ocurre esto y la velocidad de la corriente de agua es suficientemente alta, se produce el bolsillo de erosión, mientras que la parte de la superficie no afectada por el proceso se convierte en el remanente de mata (Gerdes, 1993; Noffke, 1999, 2010).

El tamaño de los bolsillos de erosión aumenta a medida que continúa la erosión, desprendiendo fragmentos de los bordes del remanente, lo que puede generar otras estructuras como fragmentos de mata. A medida que los bolsillos de erosión crecen, pueden unirse dos o más bolsillos, creando una estructura muy irregular y de mayor tamaño (Noffke, 1999, 2010).

Los bolsillos de erosión tienen la característica de que, en su interior, sobre el sedimento expuesto no colonizado por microorganismos, se forman ondulitas debido a las corrientes de marea (Noffke, 2010; Cuadrado y Blasi, 2018).

7 COMPARACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS HALLADAS CON EL REGISTRO FÓSIL

En este apartado se realiza una comparación entre la morfología y ubicación de las estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM) halladas en un ambiente de planicie de marea moderno y ESIAM halladas en el registro fósil en ambientes análogos, con el objetivo de visualizar sus similitudes y diferencias.

Debido a las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla una planicie de marea, hallar rastros en el registro fósil que permitan analizar y comprender dicho paleoambiente resulta una tarea difícil, ya que los agentes erosivos que actúan en estos ambientes suelen “barrer” información. El desarrollo de la geobiología y la profundización del estudio de las matas microbianas en ambientes modernos, proporciona una herramienta útil para analizar y comprender las planicies de mareas halladas en el registro fósil.

Las ESIAM modernas utilizadas fueron las descriptas en este trabajo, las mismas se encontraron en la planicie de marea de la bahía San Antonio Este, en la Provincia de Río Negro, Argentina. Para el análisis de estructuras fósiles se recurrió a la bibliografía, donde diversos autores describen ESIAM halladas en distintos afloramientos, siendo estos principalmente de edades proterozoicas, aunque también los hay de edades fanerozoicas.

Para el desarrollo de este capítulo se utilizaron artículos realizados por MacKenzie (1975), Bouougri y Porada (2007, 2011) y Noffke *et al.* (2008).

7.1 Domos de gas

En la bahía San Antonio Este, los domos de gas se ubican principalmente en la zona intermareal, estos se presentan como estructuras abovedadas con cúpulas de formas ovaladas o irregulares, que varían en tamaño desde pocos centímetros hasta varios decímetros de diámetro (Fig. 17A y B).

El estudio realizado por Noffke *et al.*, (2008), se desarrolló sobre rocas que corresponden a un ambiente de planicie de marea que existió hace aproximadamente 2,9 Ga. Las rocas estudiadas corresponden al Mb. Kwaaiman de la Fm. Sinqueni, Gpo. Moozan, Supergrupo Pongola de la sección Nhlazatse en Sudáfrica. La unidad está conformada por conglomerados, cuarcitas, areniscas finas, limos y lutitas (Beukes y Cairncross, 1991). En la parte superior la Fm. Sinqueni, se encuentran domos de gas ubicados en la zona supramareal.

Estos presentan una morfología de cúpula circular, las cuales varían desde 5 hasta más de 30 cm de diámetro en su base, con superficies lisas o arrugadas, y alcanzan una altura aproximada de 3 cm (Fig. 17C) (Noffke *et al*, 2008).

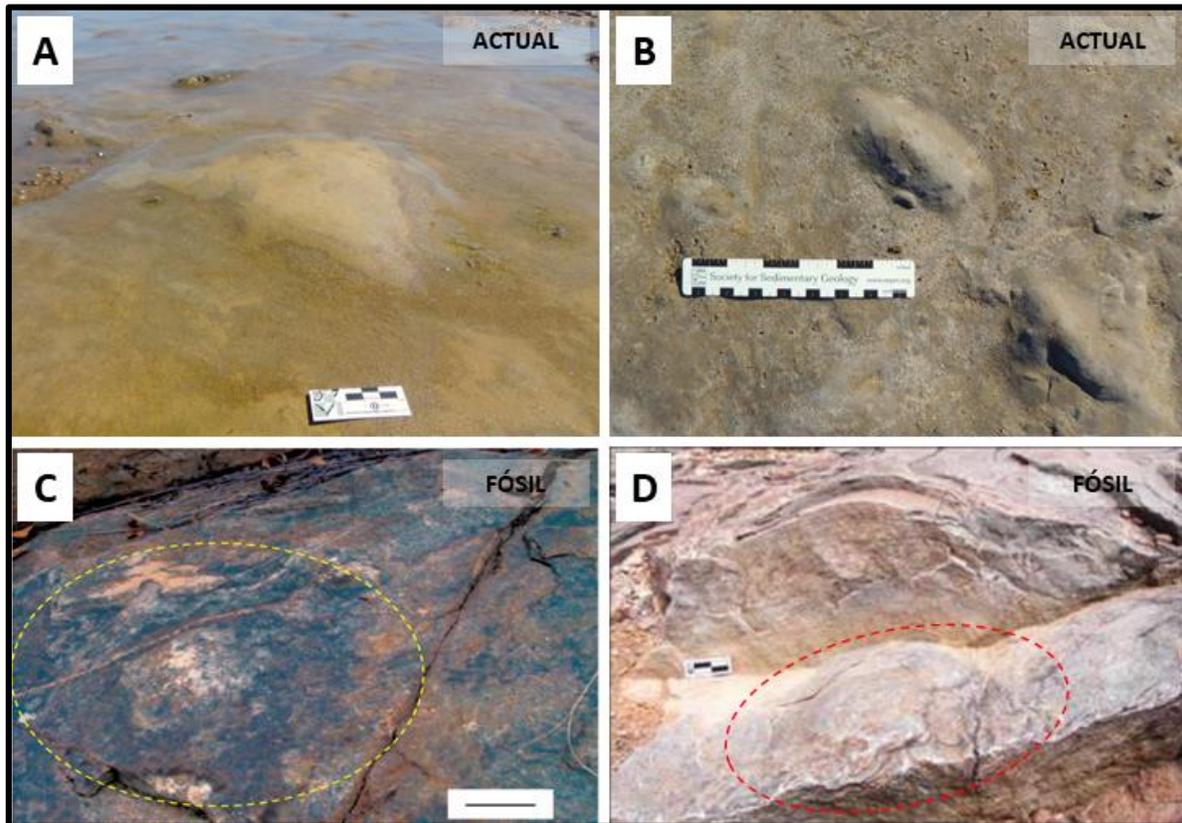


Figura 17. Comparación de domos de gas actuales y fósiles. A y B) Domos de gas modernos hallados en la planicie de marea en la bahía San Antonio Este (largo total de la escala: A = 3 cm, B = 15 cm). C) Domo de gas fósil (líneas punteadas amarillas), perteneciente al Supergrupo Pongola, Sudáfrica (escala: 5 cm) (extraído y modificado de Noffke *et al*, 2008). D) Domo de gas fósil (líneas punteadas rojas), aflorando en el Grupo Tizi n-Taghatine, Marruecos (largo total de la escala: 2 cm) (extraído y modificado de Bouougri y Porada, 2011).

Bouougri y Porada (2011) estudiaron depósitos silicoclásticos biolaminados, entre los que analizaron las ESIAM encontradas en el Gpo. Tizi n-Taghatine de aproximadamente 0,8 Ga. Este grupo aflora en el Cinturón Anti-Atlas, en el oeste del Cratón Africano. El Gpo. Tizi n-Taghatine está conformado por depósitos sedimentarios y volcánicos, las estructuras fósiles estudiadas se desarrollaron en depósitos heterolíticos de un ambiente de planicie de marea (Bouougri y Porada, 2011).

Los domos de gas hallados en el Gpo. Tizi n-Taghatine, descritos por Bouougri y Porada (2011), presentan una distribución irregular en la superficie, hallándose especialmente en la zona intermareal. Estas estructuras subcirculares alcanzan diámetros de hasta 30 cm y sus cúpulas presentan alturas que varían desde 5 hasta 20 cm (Fig. 17D).

Las estructuras de domos de gas fósiles, al igual que los domos actuales, se generaron por la acumulación de gases entre la mata y el sedimento subyacente, elevando la mata microbiana. Los domos de gas analizados en el registro fósil se encuentran rellenos de roca arenisca (Noffke *et al.*, 2008; Bouougri y Porada, 2011), a diferencia de los domos muestreados en la planicie de marea actual, los cuales contenían un interior ocupado por aire.

7.2 Grietas de contracción

Las grietas de contracción en la bahía San Antonio se encuentran en la zona intermareal y en la supramareal. Estas estructuras pueden encontrarse en forma subcircular (Fig. 18A) como también en forma de trirradiada (Fig. 18B). Las primeras se caracterizan por ser grietas superficiales de 40 cm de longitud y de hasta 3 cm de separación entre los bordes, ubicándose en la zona supramareal, y las grietas de triple unión, halladas en la zona intermareal, están representadas por tres márgenes agrietados que convergen en un punto central y con bordes que presentan un leve enrollamiento hacia arriba.

Bouougri y Porada (2007), estudiaron las ESIAM halladas en el Mb. Vingerbreek de la parte superior de la Fm. Nadaus, Gpo. Nama, en Namibia. Estas rocas según, estudios radiométricos, presentan una edad entre 545 a 548 Ma, y están conformadas por intercalaciones de lutitas, limolitas y areniscas, depositadas en un ambiente de planicie de mareas (Grotzinger *et al.*, 1995).

En el Mb. Vingerbreek se hallan grietas de contracción conservadas en rocas limolitas y areniscas muy finas correspondientes a zonas intermareal y supramareal. En la figura 18C (recuadro con línea punteada amarilla) se observa una grieta de contracción recta, de 30 cm de longitud, con márgenes separados alrededor de 1 cm y 3 cm de altura, los cuales desarrollan formas cóncavas hacia abajo (Bouougri y Porada, 2007).

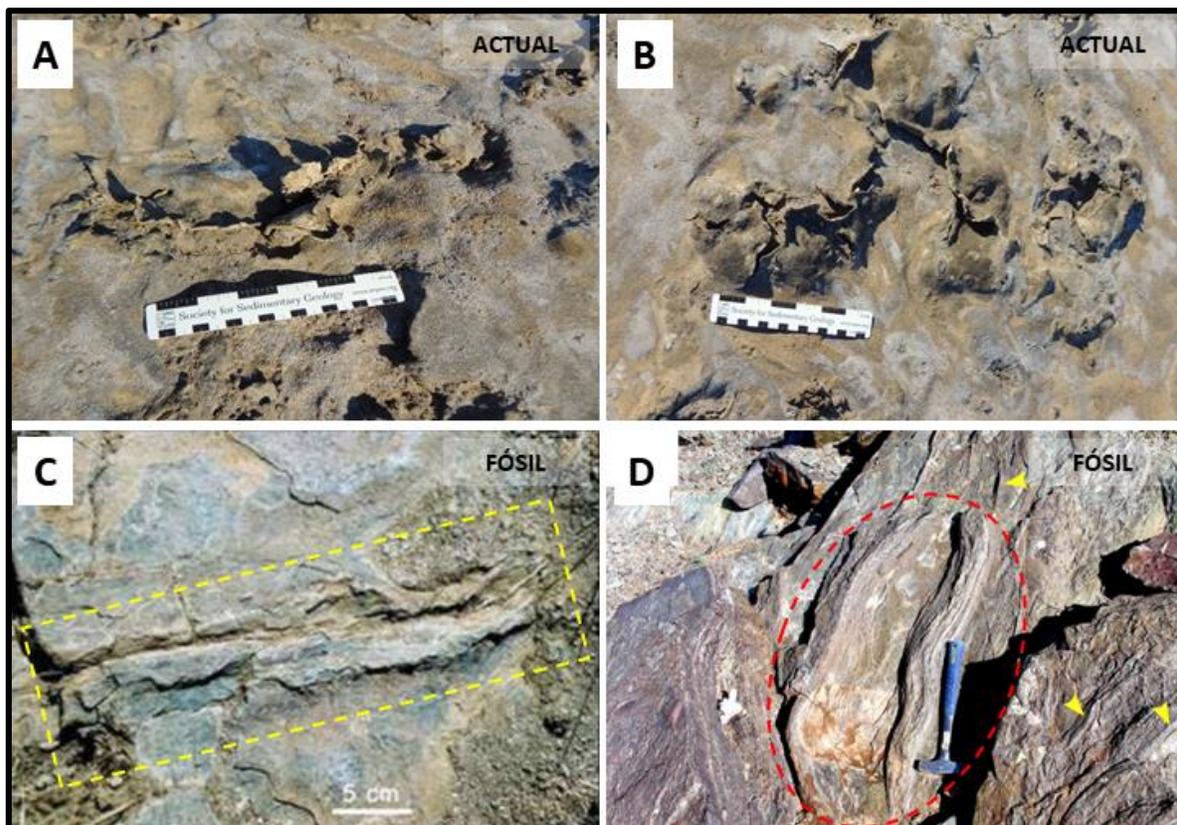


Figura 18. Comparación de grietas de contracción modernas y fósiles. A) Grieta subcircular hallada en la zona supramareal en un ambiente moderno de planicie de marea, bahía San Antonio Este (largo total de la escala: 15 cm). B) Grietas de contracción modernas del tipo triple unión, halladas en la zona intermareal de la planicie de marea en la bahía San Antonio Este (largo total de la escala: 15 cm). C) Grietas de contracción recta (recuadro punteado amarillo) con márgenes volcados hacia arriba, halladas en la Fm. Nadeus, del Gpo. Nama (extraído y modificado de Bouougri y Porada, 2011). D) Grieta de contracción fósil, de forma poligonal (circunferencia punteada roja) con márgenes volcados hacia arriba. Las flechas amarillas indican grietas de contracción en forma de huso. Estructuras descritas en el Gpo. Tizi n-Taghatine (extraído de Bouougri y Porada 2007).

Similarmente, en el Gpo. Tizi n-Taghatine, las grietas de contracción se encuentran en la zona intermareal y supramareal. Estas estructuras se hallan en forma de polígono alargado, donde su lado mayor alcanza los 50 cm, sus bordes, que atraviesan varias capas pequeñas de material limoso, se encuentran volcados hacia arriba y tienen una altura entre 4 y 5 cm (Fig. 18D). En la misma imagen (flechas amarillas) se observan grietas de menor tamaño con forma de huso, las cuales están rellenas por materiales silicoclásticos (Bouougri y Porada, 2011).

Tanto en las grietas de contracción actuales, como en las grietas de contracción fósiles, la causa principal que origina estas estructuras corresponde a los prolongados periodos de exposición solar de la capa microbiana que resulta en su pérdida de humedad (Bouougri y Porada, 2007, 2011).

7.3 Fragmentos de matas

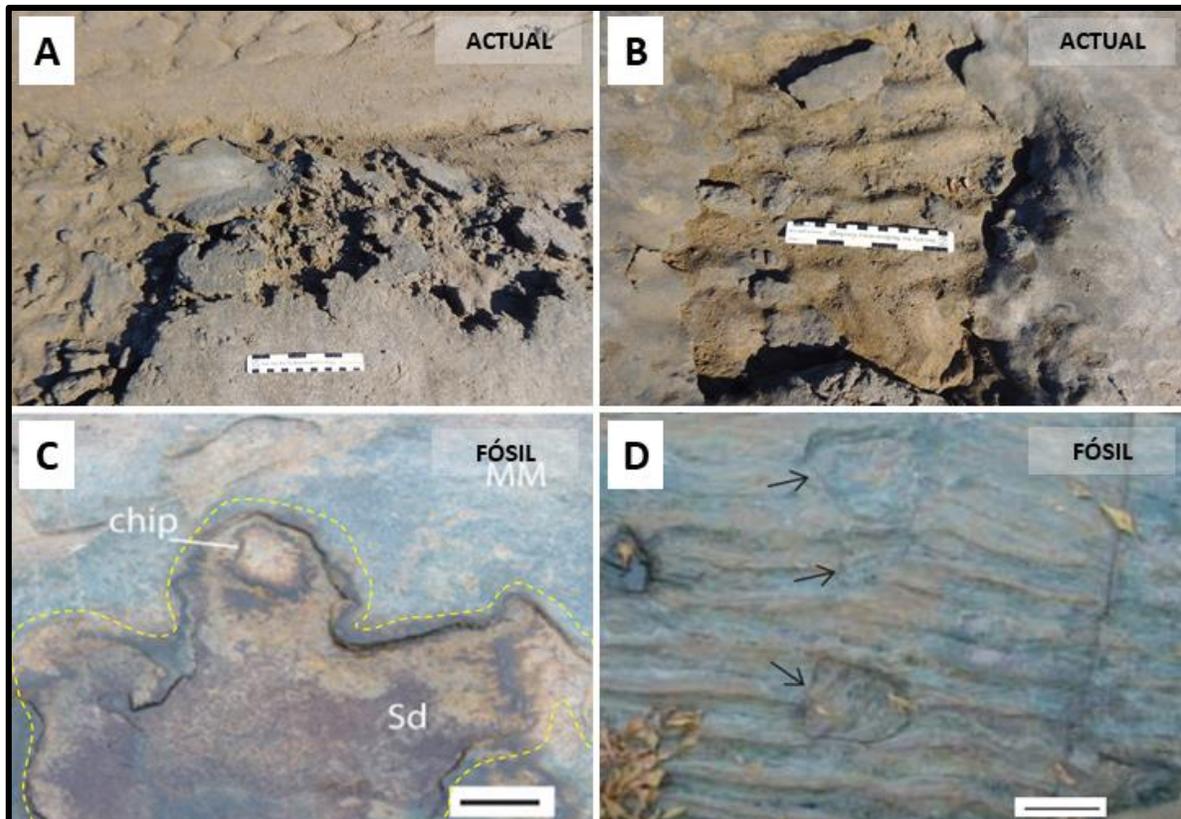


Figura 19. Comparación de fragmentos de mata modernas y fósiles, desarrolladas en un ambiente de planicie de mareas. A) Fragmentos de matas actuales en la zona intermareal asociados a un arroyo de marea en la bahía San Antonio Este (largo total de la escala: 15 cm). B) Fragmento de matas modernos en la zona intermareal de la bahía San Antonio Este, asociados a bolsillos de erosión (largo total de la escala: 15 cm). C) Fragmento de mata (flecha blanca) en la zona supramareal asociado a un bolsillo de erosión (líneas punteadas amarillas), escala: 4 cm (extraído y modificado de Noffke et al., 2008). D) Fragmento de matas fósiles (flechas negras) en la zona intermareal de la Fm. Sinqueni perteneciente al Supergrupo Pongola, escala: 5 cm (extraído de Noffke et al., 2008).

En cuanto a los fragmentos de matas microbianas, en la bahía San Antonio se observa que estas estructuras se ubican en la zona intermareal. Algunas de estas ESIAM se encuentran asociadas a los arroyos de mareas, las mismas pueden alcanzar hasta 25 cm de longitud y

tienen bordes irregulares (Fig. 19A). Otros fragmentos de matas se forman en asociación con los bolsillos de erosión, en este caso se encuentran fragmentos de hasta 9 cm de longitud, con bordes rectos, los cuales se pueden correlacionar con los bordes de los bolsillos de erosión (Fig. 19B).

En la Fm. Sinqueni del Supergrupo Pongola, Noffke *et al.* (2008) describieron fragmentos de mata hallados en las zonas intermareal y supramareal de una planicie de marea fósil.

En la sección superior de la Fm. Sinqueni, Noffke *et al.* (2008) remarcaron la existencia de fragmentos de mata en la zona supramareal. En este caso la estructura de 2,5 cm de largo se encuentra asociada a un bolsillo de erosión y los bordes de ambas estructuras son coincidentes (Fig. 19C).

En la sección inferior de la Fm. Sinqueni, las estructuras halladas corresponden a la zona intermareal, estas presentan un largo entre 3 y 4 cm y sus bordes son irregulares (Fig. 19D) (Noffke *et al.*, 2008).

Estos fragmentos de mata, tanto en el caso moderno como en el fósil, se producen cuando las corrientes de agua tienen la suficiente energía para arrancar partes de la capa microbiana del sustrato (Noffke *et al.*, 2008).

7.4 Enrollamientos

Las estructuras del tipo enrollamientos estudiadas en la planicie de marea actual, se encuentran asociadas a los arroyos de mareas en la zona intermareal. Su morfología consiste en una lámina de 5 mm de espesor enrollada en hasta tres vueltas, la cual estaba constituida por mata microbiana y material siliciclásticos. Esta estructura enrollada alcanza alturas de 3 cm y una longitud aproximada de 25 cm (Fig. 20A).

En las rocas silicoclásticas de la Fm. Sinqueni, Supergrupo Pongola, de la sección Nhlazatse, Noffke *et al.* (2008, 2022) describieron la existencia de estructuras de enrollamientos en un ambiente de planicie de marea.

Noffke *et al.* (2008, 2022) describieron una ESIAM del tipo enrollamiento, la cual se desarrolla en un subambiente supramareal. En el afloramiento se observa la vista lateral del enrollamiento, el cual tiene forma de lente, alcanzando una altura de 10 cm y alrededor de 30 cm de ancho. La capa que constituye el enrollamiento de, por lo menos, una vuelta está

conformada por material de origen silicoclástico, cuyo espesor entre ambos componentes no supera los 2 cm (Fig. 20B).

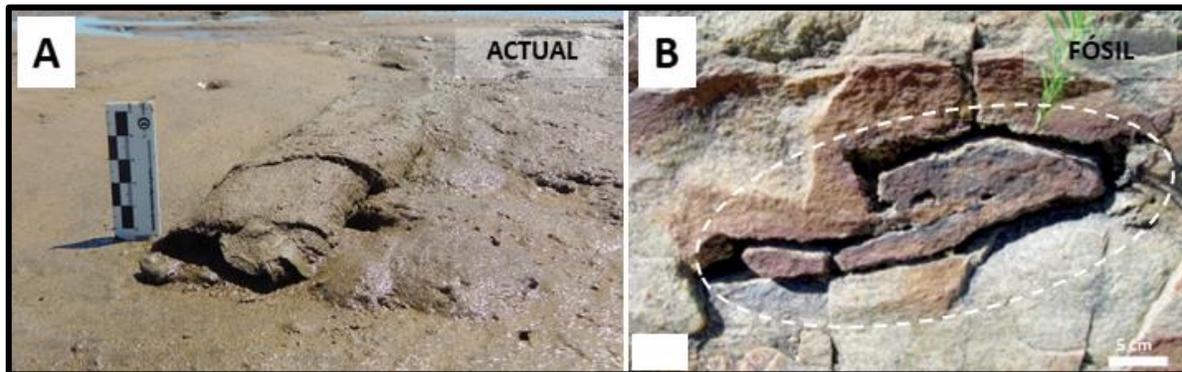


Figura 20. Comparación de enrollamientos actuales y fósiles. A) Enrollamiento moderno de tres vueltas en la planicie de marea de la bahía San Antonio Este (largo total de la escala: 5 cm). B) Enrollamiento fósil de una vuelta (circunferencia punteada blanca) en afloramientos del Supergrupo Pongola, Sudáfrica (extraído de Noffke et al., 2022).

Estas estructuras son producidas por la acción que generan las corrientes de fondo sobre el sustrato. Estas corrientes tienen la energía suficiente para desprender parte de la mata microbiana y enrollarla, pero sin despegarla del remanente (Noffke *et al.*, 2022).

7.5 Bolsillos de erosión y remanentes de matas

En la planicie de marea moderna, ubicada en la bahía San Antonio Este, en la zona intermareal, asociadas principalmente a las superficies planas colonizadas por matas microbiana, se hallan las estructuras definidas como bolsillos de erosión y remanentes de matas. En la Figura 21A se observa un bolsillo de erosión de bordes irregulares, que alcanza los 120 cm de largo y alrededor de 40 cm de ancho. Esta estructura, la cual se encuentra rodeada por superficie de mata sin erosionar (remanentes), presenta ondulitas en el material silicoclástico subyacente.

Noffke *et al.* (2008), en su estudio realizado sobre la Fm. Sinqueni, describe la presencia de estructuras del tipo bolsillo de erosión y remanentes de matas en superficies de areniscas. Los bolsillos de erosión de bordes irregulares se ubican en la zona supramareal y alcanzan diámetros de entre 50 y 200 cm. En su interior estas estructuras albergan fragmentos de

matas, los cuales pueden ser desprendidos de los bordes cercanos que conforman al remanente de mata (Fig. 21B).

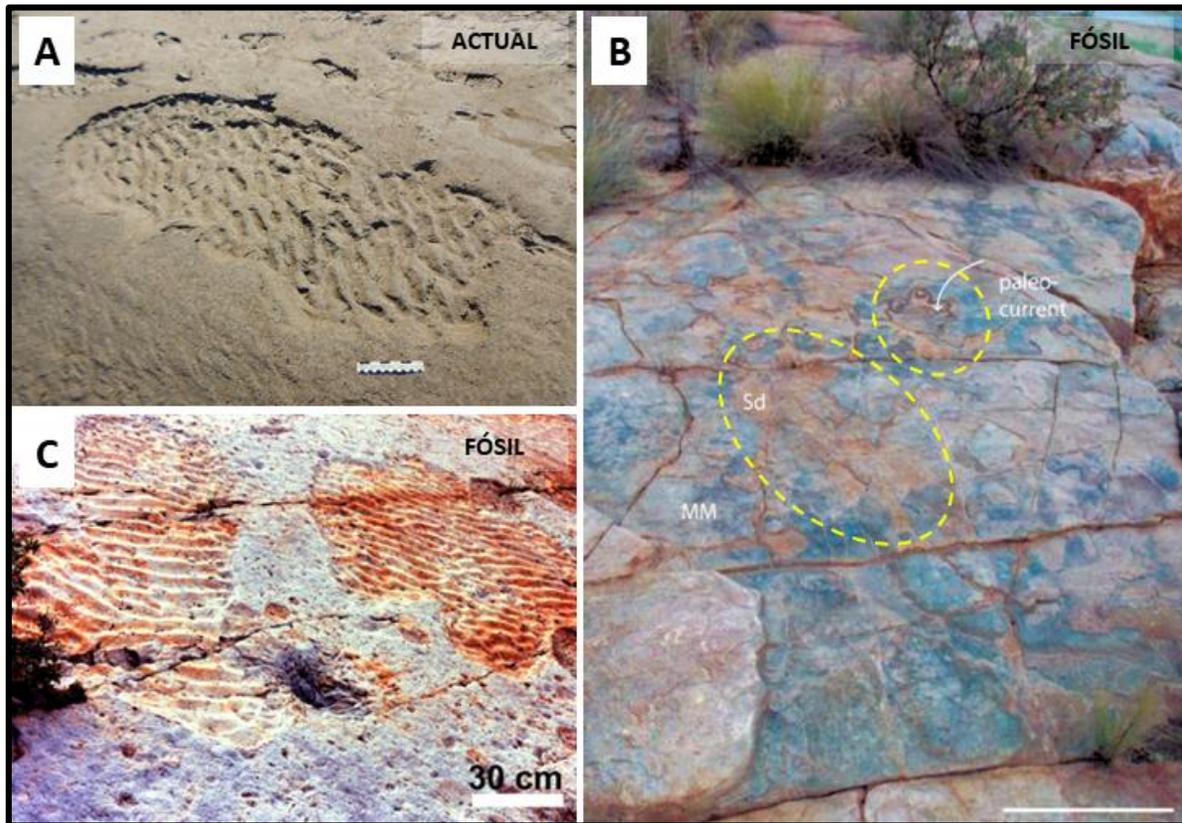


Figura 21. Comparación entre bolsillos de erosión y remanentes de matas actuales y fósiles, halladas en ambientes de planicie de marea. A) Bolsillo de erosión y remanentes de matas en la zona intermareal de la planicie de marea de la bahía San Antonio Este (largo total de la escala: 15 cm). B) Bolsillos de erosión fósiles (circunferencias amarillas), rodeados por superficie bioestabilizada, en la Fm. Siqueni, Supergrupo Pongola, Sudáfrica, escala: 40 cm (extraído y modificado de Noffke et al., 2008). C) Bolsillos de erosión fósiles con ondulitas en su superficie, en el Gpo. Dakota, Estados Unidos (extraído de Schieber et al., 2007).

MacKenzie en la década del 70 publicó varios artículos sobre el estudio de la parte superior del Gpo. Dakota, Cretácico Inferior, de afloramientos entre los estados de Denver y Dakota, Estados Unidos. Dentro de este grupo se identificaron distintos ambientes, siendo en un ambiente de planicie de marea donde se desarrollaron ESIAM (MacKenzie, 1975). La sección superior del Gpo. Dakota está conformada principalmente por areniscas cuarzosas de grano fino a muy fino intercaladas con lutitas. MacKenzie (1975), describió en areniscas

de ambiente de planicie de marea, la existencia de parches bioestabilizados con ondulitas en su interior. Estos bolsillos de erosión de bordes irregulares presentan un largo de aproximadamente 150 cm y un ancho que varía entre 60 y 90 cm (Fig. 21C).

Los bolsillos de erosión y los remanentes de matas se desarrollan en zonas con sedimento bioestabilizados, donde el ambiente genera fuentes de energía lo suficientemente altas (por ejemplo, corrientes de marea), que aprovechan zonas desbioestabilizadas y erosionan remanentes de matas, generando los llamados bolsillos (Noffke *et al.*, 2008).

8 CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado sobre las estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM) encontradas en la planicie de marea de la bahía San Antonio Este se puede concluir que:

- La planicie de marea ubicada en la bahía San Antonio Este se encuentra colonizada por matas microbianas.
- Las matas microbianas halladas en la bahía desarrollan ESIAM.
- Las ESIAM encontradas en la planicie de marea de la bahía San Antonio Este son: domos de gas, grietas de contracción, enrollamientos, fragmentos de matas y bolsillos de erosión y remanentes de matas.
- Las ESIAM desarrolladas en la planicie de marea solo se encuentran en las zonas intermareal y supramareal, zonas donde se dan las condiciones hidrodinámicas necesarias para su desarrollo.
- El patrón de distribución y abundancia de las ESIAM refleja la interacción entre los factores hidrodinámicos y ambientales que caracterizan la planicie de marea de la bahía San Antonio Este.
- En la zona intermareal se halla una gran variedad de ESIAM, debido a que el área genera condiciones ambientales variadas, desarrollando zonas de alta y baja energía, como también importante alternancia entre los periodos de sequedad y humedad. Las áreas con mayor generación de energía en la planicie son los arroyos de marea de la zona intermareal, coincidente con las áreas donde se hallan ESIAM con un requerimiento energético alto para su formación, como los fragmentos de matas, enrollamientos y bolsillos de erosión y remanentes de matas.
- Sobre la zona supramareal se desarrollan abundantes grietas de contracción producto de la exposición a periodos de sequedad de las matas microbianas
- A partir de la comparación entre las ESIAM actuales y las fósiles se puede concluir que condiciones ambientales similares, pero ocurridas en distintos momentos, han generado las mismas (ESIAM).

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anekant, J., Gupta, Y., Agrawal, R., Khare, P. y Sanjay, K. (2007). Biofilms - A Microbial Life Perspective: A Critical Review. *Critical Reviews in Therapeutic Drug Carrier Systems*, 24(5), 393-443.
- Angulo, R., Fidalgo, M., Gómez M. y Schnack, E. (1978). Las ingresiones marinas cuaternarias en la bahía de San Antonio y sus vecindades, provincia de Río Negro. *Actas del 7º Congreso Geológico Argentino* (pp. 271-283).
- Aref, M. y Taj, R. (2018). Recent evaporite deposition associated with microbial mats, Al-Kharrar supratidal-intertidal sabkha, Rabigh area, Red Sea coastal plain of Saudi Arabia. *Facies*, 64(4), 1-23.
- Banerjee, S., Sarkar, S. y Eriksson, P. (2014). Palaeoenvironmental and biostratigraphic implications of microbial mat-related structures: Examples from the modern Gulf of Cambay and the Precambrian Vindhyan Basin, India. *Journal of Palaeogeography*, 3(2), 127-144.
- Beukes, N. y Cairncross, B. (1991). A lithostratigraphic sedimentological reference profile for the late Mozaan Group, Pongola Sequence: Application to sequence stratigraphy and correlation with the Witwatersrand Supergroup. *South African Journal of Geology*, 94(1), 44-69.
- Bose, S. y Chafetz, H. (2009). Topographic control on distribution of modern microbially induced sedimentary structures (MISS): A case study from Texas coast. *Sedimentary Geology*, 213, 136-149.
- Bouougri, E. y Porada, H. (2007). Siliciclastic biolaminites indicative of widespread microbial mats in the Neoproterozoic Nama Group of Namibia. *Journal of African Earth Sciences*, 48, 38-48.
- Bouougri, E. y Porada, H. (2011). Biolaminated Siliciclastic Deposits. En *Advances in Stromatolite Geobiology. Lecture Notes in Earth Sciences* (Vol. 131, pp. 507-524). Springer.

- Bouougri, E. y Porada, H. (2012). Wind-induced mat deformation structures in recent tidal flats and sabkhas of SE-Tunisia and their significance for environmental interpretation of fossil structures. *Sedimentary Geology*, 263-264, 56-66.
- Bournod, C., Cuadrado, D., Carmona, N., Ponce, J. y Pan, J. (2014). Estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM) en la planicie de marea de Puerto Rosales, estuario de Bahía Blanca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71(3), 331-344.
- Carbone, M., Perillo, G. y Piccolo, M. (2007). Dinámica morfológica de los ambientes costeros de bahía San Antonio oeste, provincia de Río Negro. *Geoacta*, 32, 83-91.
- Cuadrado, D. y Blasi, A. (2018). Reconocimiento de actividad microbiana en ambientes silicoclásticos actuales y en paleoambientes. Estudio comparativo para el establecimiento de análogos. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 24(2), 39-73.
- Davies, J. (1964). A morphogenetic approach to world shorelines. *Zeitschrift Geomorph*, 8(5), 127-142.
- De Beer, D. y Stoodley, P. (2006). Microbial biofilms. En M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. Schleifer y E. Stackebrandt (eds.), *The Prokaryotes* (pp. 904-937). Springer.
- Fidalgo, F. y Riggi, J. (1970). Consideraciones geomórficas y sedimentológicas sobre los Rodados Patagónicos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 25(4), 430-443.
- Fucks, E., Schnack, E. y Charó, M. (2012). Aspectos geológicos y geomorfológicos del sector N del Golfo San Matías, Río Negro, Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 25(1-2), 95-105.
- Gerdes, G. (2007). Structures left by modern microbial mats in their host sediments. En Schieber, J. Bose, P. Eriksson, P. Banejeree, S. Sarkar, S. Altermann, W. y Catuneau, O (eds.), *Atlas of microbial mat features preserved within the clastic rock record* (pp. 5-38). Elsevier.

- Gerdes, G., Claes, M., Dunajtschik-Piewak, K., Riege, H., Krumbein, W. y Reineck, H. (1993). Contribution of microbial mats to sedimentary surface structures. *Facies*, 29, 61-74.
- Gerdes, G., Krumbein, W. y Noffke, N. (2000). Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments: a catalogue. *Sedimentology*, 47, 279-308.
- Gerdes, G., Krumbein, W. y Reineck, H. (1991). Biolaminations – Ecological versus depositional dynamics. En Einsele, G., Ricken, W. y Seilacher, A. (eds.), *Cycles and events in stratigraphy* (pp. 592-607), Springer-Verlag.
- Giacosa, R. (1993). El ciclo eruptivo Gondwánico en el área de Sierra Pailemán, Macizo Nordpatagónico, Argentina. *Actas del 12º Congreso Geológico Argentino y 2º Congreso de Exploración de Hidrocarburos* (pp. 113-119), Buenos Aires.
- Grotzinger, J., Bowring, S., Saylor, B. y Kaufman, A. (1995). New biostratigraphic and geochronologic constraints on early animal evolution. *Science*, 270(5236), 598-604.
- Harrington, H. (1962). Paleogeographic development of South America. *American Association of Petroleum Geologists*, 46, 1773-1814.
- Jorgensen, B., Revsbech, N. y Cohen, Y. (1983). Photosynthesis and structure of benthic microbial mats: microelectrode and SEM studies of four cyanobacterial communities. *Limnology and Oceanography*, 28(6), 1075-1093.
- Kokot, R. y Favier-Dubois, C. (2017). Evolución geomorfológica de la bahía de San Antonio, provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 74(3), 315-325.
- Kovalchuk, O., Owtrim, G., Konhauser, K. y Gingras, M. (2017). Desiccation cracks in siliciclastic deposits: microbial mat-related compared to abiotic sedimentary origin. *Sedimentary Geology*, 347, 67-78.
- Lakhdar, R., Soussi, M. y Talbi, R. (2020). Modern and Holocene microbial mats and associated microbially induced sedimentary structures (MISS) on the southeastern coast of Tunisia (Mediterranean Sea). *Quaternary Research*, 100, 77-97.

- Lizuain, A. (1983). Descripción geológica de la Hoja 38j, Salinas del Gualicho, provincia de Río Negro. *Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Escala 1:200.000. Servicio Geológico Nacional, Boletín 195*, 44 pp., Buenos Aires.
- Lizuain, A. y Sepúlveda, E. (1978). Geología del Gran Bajo del Gualicho (Provincia de Río Negro). *Actas del 7º Congreso Geológico Argentino* (pp. 407-422). Buenos Aires.
- MacKenzie, D. (1975). Tidal sand flat deposits in Lower Cretaceous Dakota Group Near Denver, Colorado. En Ginsburg, R., (ed.), *Tidal Deposits. A Casebook of Recent Examples and Fossil Counterparts* (pp. 116-126). Springer-Verlag.
- Maisano, L. (2019). Estructuras sedimentarias generadas por presencia de matas microbianas en un ambiente evaporítico costero. Procesos de formación y preservación. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur, 135 pp., Bahía Blanca.
- Malumián, N., Echevarría, A., Martínez Macchiavello, J. y Náñez, C. (1984). Los Microfósiles. En Baldis, M. y Peri, A., (eds.), *Relatorio del 9º Congreso Geológico Argentino: Geología y recursos Naturales de la provincia de Río Negro* (pp. 485-526). Buenos Aires.
- Martínez, H., Náñez, C., Lizuain, A., Dal Molin, C., Turel, A., Dalponte, M. y Faroux, A. (2001). Hoja Geológica 4166-II, San Antonio Oeste, provincia de Río Negro (1:250.000). Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, *Boletín 254*, 32 pp., Buenos Aires.
- Morales, J. (2022). Tide-Dominated Systems II: Tidal Flats and Wetlands. En Morales, J. (ed.), *Coastal Geology*, (pp. 289-306). Springer Textbooks in Earth Sciences.
- Noffke, N. (1999). Erosional remnants and pockets evolving from biotic-physical interactions in a Recent lower supratidal environment. *Sedimentary Geology*, 123, 175-181.
- Noffke, N. (2002). The concept of geobiological studies: the example of bacterially generated structures in physical sedimentary systems. *Palaios*, 17(6), 1-3.

- Noffke, N. (2009). The criteria for the biogenicity of microbially induced sedimentary structures (MISS) in Archean and younger, sandy deposits. *Earth Science Reviews*, 96, 173-180.
- Noffke, N. (2010). *Geobiology: Microbial mats in sandy deposits from the Archean Era to today*. Springer, New York.
- Noffke N., Beraldi-Campesi H., Callefo F., Carmona N., Cuadrado G.D., Hickman-Lewis K., Homann H., Mitchell R., Sheldon N., Westall F. y Xiao S. (2022). Microbially Induced Sedimentary Structures (MISS). *Treatise Online*, 162, Part B, 2(5), 1-29.
- Noffke, N., Beukes, N., Bower, D., Hazen, R. y Swift, D. (2008). An actualistic perspective into Archean worlds: (cyano-) bacterially induced sedimentary structures in the siliciclastic Nhlazatse Section, 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa. *Geobiology*, 6, 5-20.
- Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T. y Krumbein, W. (1996). Microbially induced sedimentary structures-examples from modern sediments of siliciclastic tidal flats. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I (1-2)*, 307-316.
- Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T. y Krumbein, W. (2001). Microbially induced sedimentary structures: A new category within the classification of primary sedimentary structures. *Journal of Sedimentary Research*, 71(5), 649-656.
- Olszewski, T. (2001). Geobiology: A Golden Opportunity and a Call to Action: *Palaios*, 16(6), 533-534.
- Paterson, D. y Black. K. (2000). Temporal variability in the critical erosion threshold of salt marsh and upper intertidal sediments. En Sherwood, B., Gardiner, B. y Harris, T. (eds.), *British Saltmarshes* (pp. 51-63). Elsevier.
- Perillo, G. (2009). Tidal courses: classification, origin and functionality. En Perillo, G., Wolanski, E., Cahoon, D. y Brinson, M (eds.), *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach* (pp. 185-209). Elsevier.

- Perillo, G. y Piccolo, C. (2017). Cursos de marea: El sistema circulatorio de los humedales costeros. *Instituto Argentino de Oceanografía*, 26(153), 55-60.
- Porada, H. y Druschel, G. (2010). Evidence for participation of microbial mats in the deposition of the siliciclastic “ore formation” in the Copperbelt of Zambia. *Journal of African Earth Sciences* 58, 427-444.
- Porro, N. y Fidalgo, F. (1982). *Descripción Geológica de la Hoja 39j, San Antonio Oeste, Provincia de Río Negro*. Ministerio de Economía, Secretaría de Industria y Minería, Subsecretaría de Minería, Dirección Nacional de Geología y Dirección Nacional de Minería., 96 pp., Buenos Aires
- Rodríguez, M. N. (2023). Estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM) en sistemas petroleros no convencionales (Los Molles-Lajas), Cuenca Neuquina: Implicancias para el análisis paleoambiental. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Río Negro (inédito), 202 pp., General Roca.
- Roth, S. (1899). Apuntes de la geología y paleontología de los territorios del Río Negro y Neuquén. *Revista del Museo de La Plata*, 9, 143-197.
- Schieber, J. (2004). Microbial mats in the siliciclastic rock record: a summary of diagnostic features. En Eriksson, P., Altermann, W., Nelson, D., Mueller, W., Catuneanu, O. y Strand, K. (eds.), *The Precambrian Earth: Tempos and Events, Developments in Precambrian Geology*, (pp. 272-663). Elsevier.
- Schieber, J. (2007). Ripple patches in the Cretaceous Dakota sandstone near Denver, Colorado, a classical locality for microbially bound tidal sand flats. En Schieber, J. Bose, P. Eriksson, P. Banejeree, S. Sarkar, S. Altermann, W. y Catuneanu, O (eds.), *Atlas of microbial mat features preserved within the clastic rock record* (pp. 5-38). Elsevier.
- Servicio de Hidrografía Naval. (2023). *Tablas de Marea*.
https://www.hidro.gov.ar/oceanografia/tmareas/form_tmareas.asp
- Stal, L. (2012). Cyanobacterial Mats and Stromatolites. En Whitton, B. (ed.), *Ecology of Cyanobacteria II: Their Diversity in Space and Time* (pp. 625–725). Springer.

- Stal, L., Van Gernerden, H. y Krumbein, W. (1985). Structure and development of a benthic marine microbial mat. *FEMS Microbiology Ecology*, 31, 111-125.
- Toffani, M., Hesp, P., Isla, F. y Casadio, A. (2024). Evolutionary stages of active to vegetated coastal transgressive dunefields in the San Matías Gulf coast, Argentina. *Geomorphology*, 461, 16 pp.
- Van Gernerden, H. (1993). Microbial mats: A joint venture. *Marine Geology*, 113, 3-25.
- Vilas, F., Bernabéu, A., Rubio, B. y Rey, D. (2010). Estuarios, rías y llanuras intermareales. En Arche, A. (ed.), *Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (Vol. 46, pp. 619-677).
- Walter, M. (1976). Stromatolites. *Developments in Sedimentology*, 20, 1-790.
- Wingender, J., Neu, T. y Flemming, H. (1999). What are Bacterial Extracellular Polymeric Substances?. *Microbial Extracellular Polymeric Substances*, 1-19.
- Zapperi, G. (2015). Estructura y funciones ecológicas de las comunidades bentónicas en planicies de marea de la zona interna del estuario de Bahía Blanca. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Sur, 153 pp., Bahía Blanca.