



**INFORME FINAL**  
**SECRETARÍA EJECUTIVA DE LA COMISIÓN COLOMBIANA DEL OCÉANO**  
**PLAN NACIONAL DE EXPEDICIONES CIENTÍFICAS MARINAS**

## 1 Datos generales del proyecto

Título del proyecto	Diversidad, abundancia y distribución del ictioplancton y su relación con las condiciones oceanográficas y los períodosmareales en la subregión Sanquianga-Gorgona, frente al delta del río Patía.
Expedición Científica	ECP2021-I Bocas de Sanquianga
Investigadores / Filiación	Christian Bermúdez-Rivas <sup>1</sup> , Jesús Reyes <sup>1</sup> , Andrés Cuellar <sup>2</sup> , Humberto Quintana <sup>1</sup> , Alan Giraldo <sup>3</sup> , Yadi Moreno <sup>1</sup> , Fredy Castrillón <sup>1</sup> , Juan José Gallego Zerrato <sup>3</sup> , Julio César Herrera Carmona <sup>3</sup> . <sup>1</sup> Área de Protección del Medio Marino - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico. <sup>2</sup> Parques Nacionales Naturales - Dirección Territorial Pacífico <sup>3</sup> Universidad del Valle
Institución responsable	Dirección General Marítima - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico.
Instituciones aliadas	Parques Nacionales Naturales Universidad del Valle
Correos electrónicos	cbermudezr@dimar.mil.co
Fecha de entrega	2023/05/12

### 1.1 Resumen

Este estudio investigó las condiciones oceanográficas de la subregión Sanquianga-Gorgona durante los períodos de pleamar y bajamar cerca del delta del río Sanquianga, y su relación con la diversidad y abundancia del plancton, particularmente el ictioplancton.

Aunque se han realizado estudios sobre la relación entre la diversidad y productividad del plancton con variables abióticas y ciclos ambientales, pocos se han enfocado en la relación con los períodos mareales. La productividad del fitoplancton y la abundancia del zooplancton se ven afectadas por estos eventos mareales, ya que las corrientes crean flujos y reflujos que influyen en la distribución de nutrientes. La biodiversidad ha sido ampliamente utilizada como indicador del estado de salud de los ecosistemas, y es crucial comprender su dinámica y su relación con los cambios ambientales.

La covariación positiva de la biodiversidad y abundancia entre diferentes grupos taxonómicos es un tema estudiado en varios ambientes, aunque no ha sido probado en este contexto específico. Las hipótesis sugieren que esta relación puede deberse a una historia biogeográfica común o a una respuesta común a las condiciones ambientales, donde las condiciones climáticas y la disponibilidad de agua y energía influyen en la diversidad.

En este estudio se examinaron 20 variables fisicoquímicas en el delta del río Sanquianga durante los períodos mareales. Se encontró una sólida estructura espacial en la mayoría de las variables fisicoquímicas, excepto en la temperatura superficial y la variabilidad de la salinidad en la columna de agua. Estas estructuras espaciales son comunes en ambientes deltaicos y están influenciadas por los ríos. No fue posible realizar pruebas estadísticas convencionales debido a la autocorrelación.

Se observaron diferentes fuentes de variabilidad para los nitritos y nitratos en distintas bocanas, lo que sugiere que la fuente de nitritos se encuentra en el cauce del río Amarales. Los fosfatos



tuvieron como principal fuente la bocana de Sanquianga. Se identificaron dos fuentes diferenciales de variabilidad: las bocanas y el sector oceánico del área de estudio.

La temperatura superficial y la variabilidad de la salinidad no mostraron estructura espacial. El fitoplancton presentó una mayor diversidad en el área estudiada debido a las descargas de nutrientes del delta. La presencia de diatomeas en la comunidad fitoplancótica se debe a las concentraciones de silicio. No se encontraron relaciones estadísticas entre las variables fisicoquímicas y la diversidad de los ensambles, excepto para el fitoplancton.

Las estructuras espaciales en el ictioplancton fueron más marcadas y se encontraron diferencias en la riqueza y densidad entre las bocanas y los transectos. No se detectó correspondencia entre las medidas de diversidad de los dos ensambles. Las correlaciones positivas entre la densidad de células del fitoplancton y las variables fisicoquímicas se encontraron principalmente durante la marea baja.

En conclusión, las variables fisicoquímicas presentaron estructuras espaciales influenciadas por las fuentes de nutrientes y sólidos suspendidos. El fitoplancton mostró una mayor dependencia de estas variables que el ictioplancton. Las estructuras espaciales y la diversidad de los ensambles no estaban relacionadas entre sí en el área estudiada.

## 2 Sinopsis técnica

Durante la Expedición Científica Pacífico, Bocas de Sanquianga 2021-I, se recolectaron muestras de 18 estaciones en la subregión Sanquianga-Gorgona. Se analizaron en laboratorio para medir parámetros como salinidad, pH, nutrientes, clorofila a y oxígeno disuelto. Se tomaron muestras de fitoplancton, zooplancton e ictioplancton utilizando diferentes métodos de recolección. Los perfiles de temperatura, salinidad, densidad y oxígeno disuelto se midieron en campo. Se evaluó la calidad del agua mediante el índice de estado trófico (TSI), calculado a partir de la profundidad de Secchi. El laboratorio del buque se utilizó para el análisis de oxígeno disuelto, salinidad y pH. Las muestras se sometieron a pretratamiento antes de ser analizadas en el laboratorio de Dimar sede Pacífico para nutrientes y clorofila a.

**Procesamiento de muestras:** Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar nutrientes, pH, salinidad, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto y clorofila a, siguiendo métodos verificados en el laboratorio de química. Se utilizaron métodos colorimétricos para nitratos, nitratos y silicatos, y métodos específicos para fosfatos, pH, salinidad, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto y clorofila a, según normas establecidas. Para el conteo y cálculo de la densidad de zooplancton y fitoplancton se utilizaron métodos sugeridos en estándares reconocidos.

**Fase de laboratorio:** En el laboratorio, se cuantificaron las células de fitoplancton utilizando un microscopio y se identificaron las especies utilizando claves taxonómicas y bases de datos. El análisis de la diversidad del ictioplancton se realizó en otro laboratorio.

**Manejo de datos y análisis estadístico:** Se revisaron los datos primarios y secundarios para evitar errores. Se depuraron los datos utilizando herramientas de limpieza de datos. Se realizaron análisis estadísticos y gráficos utilizando paquetes específicos. Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilks y la prueba de Levene para evaluar la normalidad y homogeneidad de los datos. Se realizaron análisis de autocorrelación espacial y análisis de componentes principales (PCA) para reducir la complejidad de los datos. Se utilizaron técnicas multivariadas como Multi Response Permutation Procedure (MRPP) para comparar las categorías espaciales y temporales. Se utilizaron medidas de diversidad como el número de Hill para el fitoplancton e ictioplancton, y se realizaron análisis para determinar posibles diferencias entre las categorías utilizando la técnica del MRPP. Se utilizó el análisis de escalamiento multidimensional no métrico (nDMS) y la prueba parcial de Mantel para visualizar y correlacionar las métricas de diversidad. También



se utilizó la prueba parcial de Mantel para examinar las relaciones entre las variables hidrográficas y la biodiversidad.

**Repositorio en GitHub:** Se creó un repositorio público en GitHub con los scripts utilizados para los análisis y visualización de datos, para garantizar la reproducibilidad de los análisis.

## Resultados

### Variables fisicoquímicas

Durante el estudio, se realizaron análisis de varias variables en la superficie del área estudiada. Se encontraron diferencias significativas entre la marea alta y la marea baja, así como entre diferentes sectores y transectos.

En cuanto a los nitratos, se observó una mayor concentración en la marea baja, especialmente en la bocana Amarales. Los nitratos también mostraron una mayor concentración en la marea baja, particularmente en la bocana Guascama. Los fosfatos presentaron una mayor concentración en la bocana Sanquianga durante la marea baja, mientras que en la marea alta no se encontró una estructura espacial significativa.

Los silicatos mostraron la mayor concentración en la bocana Guascama durante la marea baja, pero no se encontró correlación espacial en la marea alta.

En cuanto a otras variables, el pH fue similar en ambas mareas, con una mediana de 8.2. La concentración de oxígeno disuelto fue mayor en la marea alta en el sector oceánico, y disminuyó hacia las bocanas. La transparencia del agua mostró una tendencia similar a la del oxígeno disuelto, siendo mayor en la marea alta y disminuyendo hacia la costa.

El TSI (Índice de Transparencia de Secchi) fue más alto en la costa y en la marea baja. La temperatura mostró un aumento hacia la costa, mientras que la salinidad mostró una tendencia a disminuir hacia la costa en la marea alta. La concentración de oxígeno en la columna de agua fue mayor en la marea alta en la bocana Sanquianga y Guascama.

En general, se observaron correlaciones espaciales significativas para varias variables en ambas mareas, con diferentes fuentes de variación en cada área de estudio.

### Variables biológicas

#### Fitoplancton

Se identificaron un total de 150 especies y UTO (unidades taxonómicas operativas) en el fitoplancton de la desembocadura del delta Sanquianga. De estas especies, 95 pertenecen a la clase Bacillarophyceae y 55 a la clase Dinophyceae. Los órdenes más representativos de la clase Bacillarophyceae son Chaetocerotanae, con 21 especies, y Coscinodiscales, con 14 especies. En la clase Dinophyceae, los órdenes más representativos son Gonyaulacales (23 especies), Dinophysiales (7 especies) y Peridiniales (7 especies).

No se encontraron diferencias significativas en la biodiversidad del fitoplancton entre los períodos mareales ni entre los transectos. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas entre los sectores costeros. La diversidad de nivel <sup>0</sup>D del fitoplancton muestra una correlación espacial positiva y significativa durante la marea alta, pero no presenta una estructura espacial durante la marea baja. La diversidad de nivel <sup>1</sup>D también muestra una correlación espacial positiva y significativa durante la marea alta, pero no presenta estructura espacial durante la marea baja. La diversidad de nivel <sup>2</sup>D no muestra correlación espacial en ninguno de los períodos mareales.



La densidad celular del fitoplancton muestra una tendencia a aumentar en el sector costero de los transectos, con un valor máximo de 29298 células por litro y un valor mínimo de 360 células por litro. La densidad celular presenta una autocorrelación espacial positiva durante la marea alta y una correlación positiva pero no significativa durante la marea baja.

La concentración de clorofila a, que indica la productividad del fitoplancton, muestra los mayores valores en el sector costero durante la marea baja. Los valores más altos de concentración de clorofila a registrados fueron de  $4.99 \mu\text{g.L}^{-1}$  y los más bajos fueron de  $0.33 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Se encontró una correlación positiva y significativa durante la marea baja, pero no durante la marea alta. La principal fuente de variación en la concentración de clorofila a se encuentra en la bocana de Sanquianga.

#### Ictioplancton

Se identificaron un total de 33 especies y UTO en la desembocadura del delta Sanquianga. Las familias más diversas fueron Scianidae, Engraulidae, Scombridae y Gobiidae. Se encontraron diferencias significativas en la biodiversidad del fitoplancton entre los períodos mareales y los transectos, pero no entre los sectores. La diversidad de nivel  $^0\text{D}$  presentó una correlación espacial positiva y significativa, con la mayor variación en el transecto de Guascama. La diversidad de nivel  $^1\text{D}$  presentó correlación espacial positiva en la marea baja. La diversidad de nivel  $^2\text{D}$  no mostró correlación espacial en ninguno de los períodos mareales. La densidad del ictioplancton presentó correlación espacial positiva en ambos períodos mareales, con la mayor variación en el transecto de Guascama. La estimación de diversidad basada en la densidad mostró diferencias entre los transectos, con Guascama siendo el más diverso en el nivel  $^0\text{D}$ , Amarales y Sanquianga similares en el nivel  $^1\text{D}$ , y Sanquianga siendo el más diverso en el nivel  $^2\text{D}$ . La marea baja mostró mayor diversidad en todos los niveles. El sector costero fue más diverso que el sector oceánico. El análisis de agrupamiento no mostró separación de categorías evaluadas, demostrando homogeneidad espacial en la composición de especies de ictioplancton.

En términos de congruencia de diversidad, se encontró una correlación significativa entre la densidad del ictioplancton y la concentración de clorofila a del fitoplancton. Además, se observaron correlaciones positivas y significativas entre las variables fisicoquímicas medidas (como nitritos, nitratos, fosfatos, oxígeno disuelto, etc.) y la densidad y diversidad de nivel cero  $^0\text{D}$  del fitoplancton. Estas correlaciones sugieren una relación entre las condiciones ambientales y la composición y abundancia del fitoplancton en el área de estudio.

#### Conclusiones

En este estudio se analizaron 20 variables fisicoquímicas en el delta del río Sanquianga durante los períodos mareales. Se encontró una sólida estructura espacial en la mayoría de las variables, pero la temperatura superficial y la variabilidad de la salinidad no mostraron estructura espacial. Las fuentes de variabilidad de los nutrientes y otras variables difieren en las distintas bocanas del delta. La presencia de nutrientes provenientes del delta contribuye a la abundancia de especies de fitoplancton, especialmente diatomeas. Factores químicos como los nutrientes son esenciales para el crecimiento y la composición del fitoplancton. El ictioplancton muestra una estructura espacial más marcada que el fitoplancton. No se encontró correspondencia entre los ensambles de fitoplancton y ictioplancton. Las correlaciones entre las métricas de diversidad y las variables fisicoquímicas fueron más evidentes para el fitoplancton. Las estructuras espaciales en los ensambles están influenciadas por las fuentes de nutrientes, sólidos suspendidos y cambios en la temperatura y salinidad. El fitoplancton muestra una mayor dependencia de las condiciones ambientales que el ictioplancton.

En resumen, se encontró una fuerte estructura espacial en las variables fisicoquímicas del delta del río Sanquianga, con diferencias en las fuentes de nutrientes y otras variables entre las bocanas. El fitoplancton está influenciado por los nutrientes y muestra correlaciones positivas con las



variables fisicoquímicas, mientras que el ictioplancton muestra una mayor independencia de las características hidrográficas del agua. Los ensambles de fitoplancton e ictioplancton son independientes entre sí y fluctúan de manera independiente. Las condiciones ambientales y las fuentes de nutrientes son factores clave en la estructura y composición de los ensambles.

### 3 Cumplimiento de objetivos

#### 3.1 Objetivo general

Objetivo general	Describir las condiciones oceanográficas en los eventos mareales de creciente a pleamar y decreciente a bajamar, en la subregión Sanquianga-Gorgona frente al delta del río Patía y evaluar su relación con la variación espacial de la abundancia y la distribución de larvas y huevos de peces, como insumo técnico para las iniciativas locales de conservación y uso sostenible	Porcentaje de avance	100 %
Resultado obtenido		Dificultades	Observaciones
Se logró evaluar completamente el ensamble de ictioplancton y relacionarlo con las variables fisicoquímicas del área.		La identificación del ictioplancton tomó mucho mas tiempo del planteado.	Se donaron muestras a la CCO para obtener los datos de moleculares de identificación, pero no se logró tener estos resultados.

#### 3.2 Objetivos específicos

Objetivo específico	Realizar la descripción sinóptica de las condiciones oceanográficas y físico químicas en los eventos mareales de creciente a pleamar y decreciente a bajamar en la subregión Sanquianga-Gorgona.	Porcentaje de avance	100%
Resultado obtenido	Dificultades	Observaciones	
Se lograron colectar todas las muestras y los datos planeados.	Debido a que no se han medido hasta el momento las estructuras espaciales en el área de estudio, no se tenía evidencia de la distancia mínima a la cual se pierden los efectos espaciales de estas variables, por lo tanto, con las muestras y los datos colectados con la grilla de toma de muestras planteada, no se lograron obtener datos independientes.	Este trabajo aporta un poco a entender las fuentes de las variables consideradas dentro de esta área que cubre aproximadamente 20 km <sup>2</sup> .	
Objetivo específico	Evaluar el comportamiento de las variables fisicoquímicas (pH, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, transparencia, amonio, nitratos, nitratos, fosfatos y silicatos); bioquímicas (clorofila a) y Biológicas (fitoplancton y zooplancton) en los períodos mareales en la subregión Sanquianga - Gorgona.	Porcentaje de avance	100%
Resultado obtenido	Dificultades	Observaciones	
Se realizaron los análisis de las muestras de agua y se logró obtener resultados de todas las	El procesamiento de las muestras biológicas y la identificación del	Ninguno.	



variables mencionadas excepto el amonio.	fitoplancton y el zooplancton tomó mucho mas tiempo del planeado. Una de las grandes dificultades de estos proyectos en controlar los tiempos de identificación sobre todo la resolución necesaria para este tipo de análisis.		
Objetivo específico	Evaluar la variación espacial del carbono inorgánico disuelto (DIC) y la alcalinidad total (AT) como parámetros asociados al sistema de carbonatos.	Porcentaje de avance	0%
Resultado obtenido	Dificultades	Observaciones	
El análisis de estas muestras no se pudo completar porque no se logró hacer la toma y el procesamiento de estas muestras en campo. Por esta razón no se presentarán análisis referentes a este punto.	Los recipientes que se manejaron para este tipo de muestras resultaron no ser los adecuados para los análisis de complejo de carbonatos, por tal razón no se pudieron presentar los resultados de este punto.		
Objetivo específico	Generar un modelo batimétrico para caracterizar el ambiente bentónico del área de muestreo.	Porcentaje de avance	0%
Resultado obtenido	Dificultades	Observaciones	
Este punto no fue necesario para el análisis de planteado, por lo tanto no se incluyó en este informe..			
Objetivo específico	Realizar la descripción sinóptica de la concentración de biomasa de zooplancton, abundancia de huevos y larvas de peces, en la subregión Sanquianga-Gorgona.	Porcentaje de avance	70%
Resultado obtenido	Dificultades	Observaciones	
Se logró identificar algunas especies del ictioplancton y el fitoplancton, pero para efectos del análisis se utilizaron unidades operativas taxonómicas.	Sobre el análisis de fitoplancton, se tuvo dificultad para identificar todas las especies encontradas por tal razón muchas se analizaron solo hasta morfoespecies.	Debido a la magnitud del análisis se decidió no incluir los datos de zooplancton en este informe, sin embargo se generaron los datos y se enviaron adjuntos. Estos datos se tratarán en la publicación que saldrán después de esta entrega.	
Objetivo específico	Explorar la relación entre el patrón espacial de variación de larvas y huevos de peces con las condiciones oceanográficas en la subregión Sanquianga-Gorgona.	Porcentaje de avance	0%
Resultado obtenido	Dificultades	Observaciones	
Se presentó un análisis exhaustivo de la	La extensión de los análisis dificultó la síntesis de mucho de los resultados, ya que se deben tratar	Se decidió crear un repositorio completo de los análisis para poder	



distribución del ictioplancton y el fitoplancton detectando estructuras espaciales agregadas de estos dos ensambles.	cada uno de los casos independientemente para la detección de estas estructuras espaciales.	compartir los métodos de análisis con el público interesado.
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------

#### 4 Introducción

Los deltas y los estuarios representan un ecotono entre el agua dulce de los ríos y el agua salina del mar abierto, conformando ecosistemas únicos. La dinámica entre el flujo del río y las corrientes de marea moldea las condiciones físicas y la diversidad y abundancia de las comunidades estuarinas (Dirisu, 2019). En la subregión Sanquianga-Gorgona, se encuentra el delta del río Patía, el más grande de la costa del Pacífico de Colombia, con una extensión de 1700 km<sup>2</sup> (Restrepo A, 2012; Restrepo Angel, 2008). Este delta es influenciado por las mareas, con un ciclo semidiurno y un rango de 2 metros (Restrepo A, 2012; Restrepo Angel, 2008). Además, aporta aproximadamente 972 toneladas de sedimentos por kilómetro cuadrado al año y alberga uno de los bosques de manglar más grandes del Pacífico colombiano, lo que lo convierte en un refugio de diversidad clave para el mantenimiento y dispersión de recursos pesqueros estratégicos (Beltrán-León & Morales Osorio, 2021).

A pesar de que el plancton es el principal actor en la transferencia de energía y carbono en muchos ecosistemas marinos y es la base de la red trófica marina, existen algunos estudios que determinen la relación de la diversidad y la productividad en general (fitoplancton y zooplancton) con condiciones abióticas como son las variables hidrológicas, la intervención antrópica o la contaminación en general y ciclos ambientales (Chang et al., 2023) pero pocos estudios se han destinado a estudiar la relación de los períodos mareales con la diversidad de estos grupos; esto se debe a la complejidad del estudio del plancton y a la dificultad para obtener datos de diferentes ensambles con resoluciones taxonómicas iguales (Dirisu, 2019). La productividad del fitoplancton se ha asociado con los cambios mareales y especie que suelen ser muy abundantes están estrechamente relacionadas con estos eventos (Borkman & Smayda, 2009), debido a que en todo el ambiente nerítico las corrientes mareales crean flujos y reflujos que dinamizan la distribución de los nutrientes a su vez el zooplancton se ve condicionado por estas respuestas del fitoplancton condicionando su productividad y abundancia (Ali et al., 2011)

Dado que la biodiversidad se ha utilizado ampliamente como un indicador del estado de salud de los ecosistemas terrestres y marinos (Chang et al., 2023; Dufrene & Legendre, 1997) , es crucial comprender su dinámica y relación con los cambios ambientales para poder diferenciar entre fluctuaciones normales del ciclo ambiental y alteraciones anormales causadas por la actividad humana (Chang et al., 2023; Pawluk et al., 2021). Los cambios en la diversidad entre grupos como el fitoplancton y el zooplancton pueden deberse a interacciones ecológicas entre estos, o bien pueden explicarse solamente por cambios ambientales que son independientes en las relaciones de estos grupos.

La covariación positiva de la biodiversidad y abundancia entre diferentes grupos taxonómicos es un tema que si bien se ha estudiado extensamente (Andersen et al., 2020; Azeria et al., 2009; Cabra-García et al., 2012; Lansac-Tôha et al., 2022; Toranza & Arim, 2010), pero no ha sido probado en muchos ambientes. Las hipótesis que están detrás de este tema son varias, algunas explican la relación positiva de diversidad entre dos grupos como la respuesta a una historia biogeográfica común o los que proponen que esta relación es explicada por una respuesta común a las condiciones ambientales (Toranza & Arim, 2010). Según esta última hipótesis se puede entender que las condiciones climáticas influyen en la diversidad a través del control de la disponibilidad de agua y energía por lo tanto esta energía disponible determina la viabilidad de especies raras y la riqueza de la comunidad. La temperatura también puede influir en la



diversidad de los taxa como limitador de las tasas vitales y como respuesta a estas relaciones se da el fenómeno de la covariación positiva de la diversidad (Toranza & Arim, 2010).

En este trabajo se analizaron las condiciones oceanográficas de la subregión Sanquianga-Gorgona en los períodos de pleamar y bajamar frente al delta del río Sanquianga y como estas condiciones están relacionadas con la diversidad y la abundancia del plancton y especialmente el

## 5 Metodología

### 5.1 Metodología efectiva de muestreo

Durante la Expedición Científica Pacífico, Bocas de Sanquianga 2021-I, realizada entre el 28 de abril y el 07 de mayo de 2021, se recolectaron muestras de 18 estaciones ubicadas en la subregión Sanquianga-Gorgona, distribuidas a lo largo de 3 transectos, cada uno con 6 estaciones en las bocanas de Guascama, Sanquianga y Amarales (ver Figura 2). Se tomaron muestras en los rangos mareales de marea alta y marea baja (ver Figura 1), y se analizaron en tres categorías basadas en el cambio temporal y espacial. El cambio temporal se basó en el comportamiento de la onda mareal y el momento en que se colectaron las muestras. El cambio espacial se basó en la separación de las bocas de los ríos donde se situaron los transectos, y entre las estaciones más cercanas a la costa y las estaciones más cercanas al espacio oceánico.

En esta área se midieron la transparencia y los perfiles de temperatura, salinidad, densidad y oxígeno disuelto en campo, y se recolectaron muestras de aguas marinas superficiales a 1 m de profundidad utilizando botellas Niskin de 10 L. Estas muestras se analizaron en laboratorio para determinar la salinidad, pH, Sólidos Suspensos Totales (SST), nitratos, fosfatos, silicatos, transparencia, clorofila a y oxígeno disuelto (OD), y para hacer análisis de riqueza de especies de fitoplancton. Las muestras de zooplancton e ictioplancton se recolectaron con una red tipo bongo de 300 y 500  $\mu\text{m}$  de ojo de malla, arrastrando durante 5 minutos a 2 nudos, y se preservaron en formol. Las muestras de fitoplancton se tomaron directamente de la superficie con un balde de 20 litros y se filtraron con una red de 50  $\mu\text{m}$ .

Los datos de los perfiles del CTDO (SeaBird 19v. Plus) y del CastAway-CTD (SonTek) se procesaron en el buque y se guardaron en formato CSV para su posterior análisis. La transparencia se midió in situ utilizando un disco Secchi para la determinación del “índice de estado trófico – TSI”, esta es una medida de la calidad del agua que se utiliza para evaluar el grado de eutrofización de los cuerpos de agua. El TSI del Secchi se basa en la medición de la profundidad a la que se puede ver un disco de Secchi blanco oceanográfico, que se sumerge en el agua y se retira lentamente hasta que desaparece de la vista. La profundidad a la que desaparece el disco se llama profundidad de Secchi. La fórmula utilizada para calcular este índice fue la siguiente:

$$\text{TSI} = 60.7 - (14.41 \times \ln(\text{profundidad de Secchi}))$$

El valor del TSI puede variar de 0 a 100, siendo los valores más bajos indicativos de un cuerpo de agua altamente eutrofizado y los valores más altos indicativos de un cuerpo de agua menos eutrofizado. Las aguas oligotróficas se caracterizan por tener un TSI entre 0-40 indicando una calidad de agua “buena”. Entre 40 y 60 TSI se clasifica como un agua mesoeutrófica con calidad “Regular” y valores de TSI entre 60 y 100 se clasifican como aguas eutróficas o hipereutróficas con una productividad biológica muy alta o con altos índice de sedimentación, con lo que se puede concluir en términos relativos que estas son aguas de “mala calidad”.



El laboratorio del buque se utilizó para las determinaciones de oxígeno disuelto (OD), salinidad y pH. Para el procedimiento de determinación de OD se utilizó un dosificador Metrhom modelo Multidosimat, y un multiparametro Schott modelo Handylab multi 12 para la determinación de la salinidad y del pH.

Las muestras destinadas a los ensayos de nutrientes y clorofila a se sometieron a pretratamiento hasta llegar al laboratorio de Dimar sede Pacífico, donde se continuó con el tratamiento analítico de las mismas para los distintos ensayos. El pretratamiento para la determinación de nutrientes consistió en filtrar aproximadamente 1 L de cada muestra por un filtro de nitrocelulosa con tamaño de poro de 0,45 µm, y tomar alrededor de 450 mL en un frasco nalgene de 500 mL para su preservación a -20 °C. Para el análisis de clorofila *a* se continuó filtrando hasta completar un volumen de 1,0 L; al filtro se le adicionaron 2 mL de suspensión de carbonato de magnesio, para luego ser introducido en un sobre de aluminio previamente rotulado, y depositado dentro de un desecador con sílica gel para su preservación a -20 °C, hasta continuar con el análisis en el laboratorio de Dimar sede Pacífico.

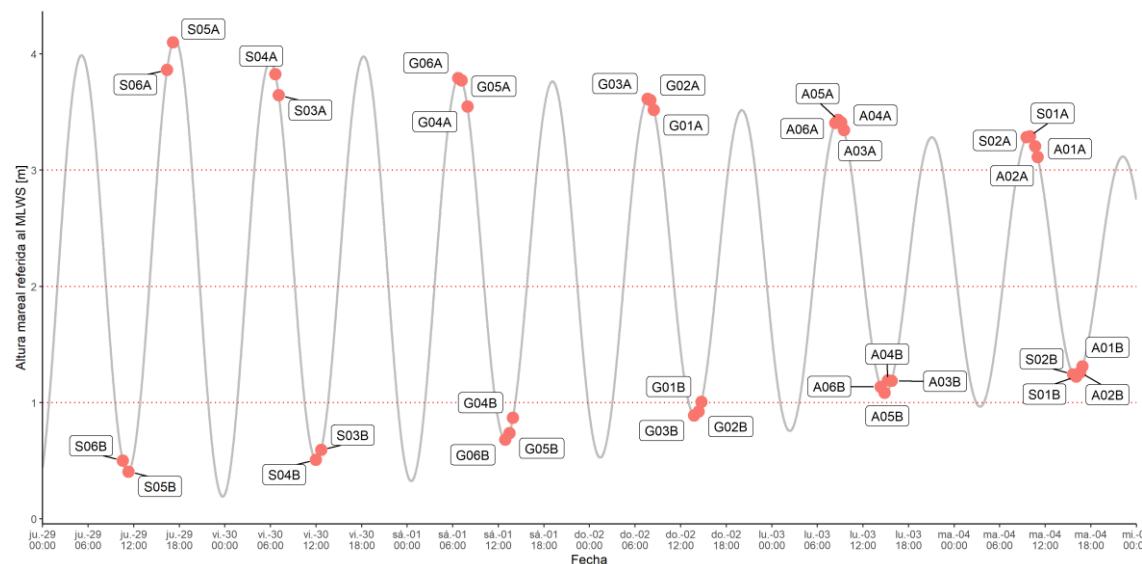


Figura 1. Comportamiento de la onda mareal entre el 28 de abril y el 07 de mayo de 2021.

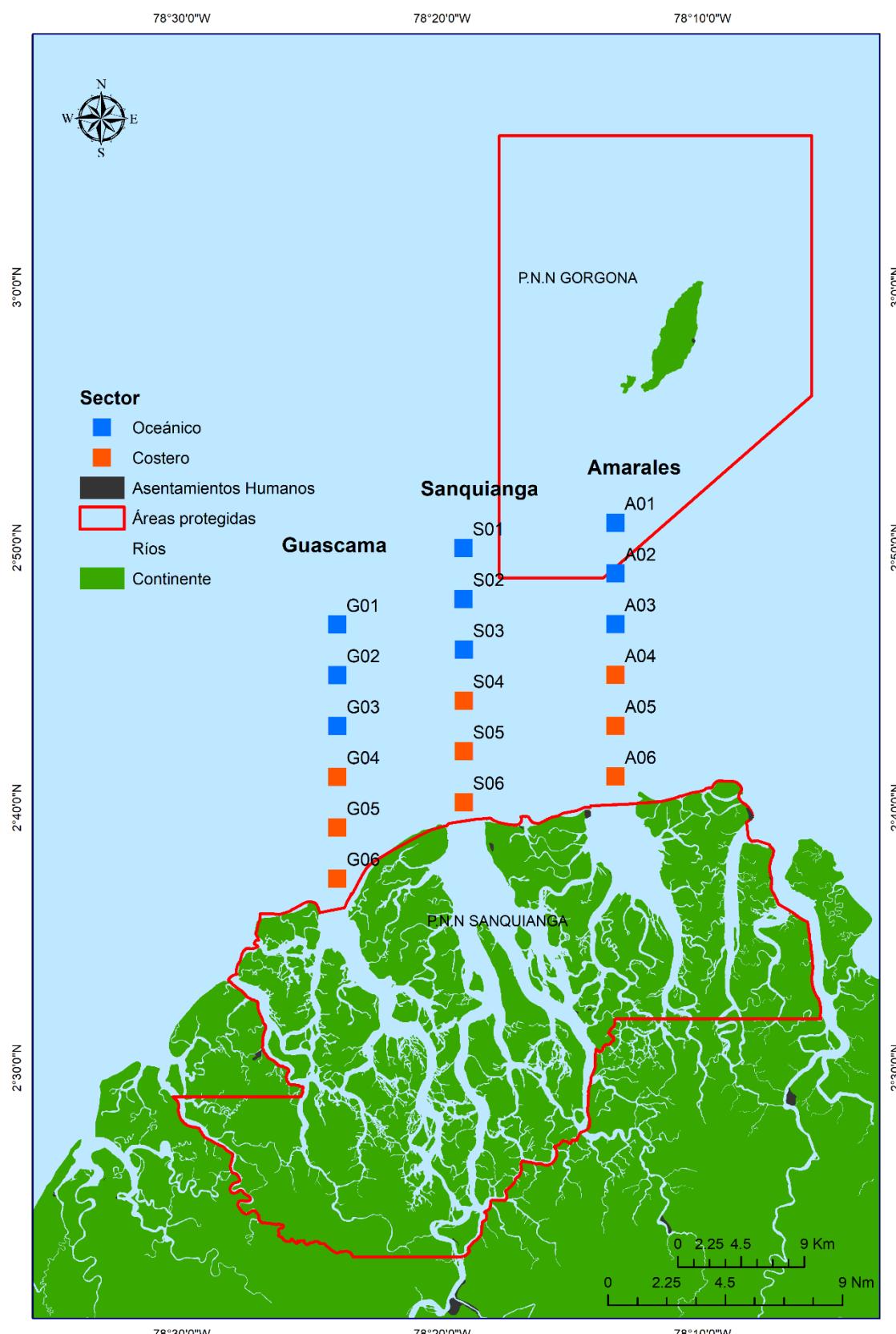


Figura 2. Estaciones de muestreo ubicadas en la zona de estudio.



## 5.2 Metodología de procesamiento y análisis de resultados

### Procesamiento de muestras:

Se llevaron a cabo ensayos de laboratorio para determinar los nutrientes, pH, salinidad (PSU), sólidos suspendidos totales (SST), Oxígeno Disuelto (OD) y clorofila a, siguiendo los métodos verificados en el laboratorio de química del Centro de investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico, y en conformidad con la norma NTC ISO/IEC 17025:2017, la cual establece los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Las determinaciones analíticas de nitratos, nitratos y silicatos se realizaron mediante métodos colorimétricos descritos por Bendschneider y Robinson (1952) y reducción con cadmio-cobre y metol-sulfito, respectivamente, tal como se describen en Strickland y Parsons (1972). Para determinar los fosfatos, se empleó el método del ácido ascórbico según lo publicado por Murphy y Riley (1958). La medición de pH y salinidad se realizó mediante los métodos 4500-H+ B y 2510 B, respectivamente. Para determinar los Sólidos Suspendidos Totales se utilizó el método 2540 D, mientras que para el Oxígeno Disuelto se usó el método yodométrico 4500-O B. Finalmente, la determinación de clorofila a se realizó aplicando el método tricromático 10200 H, todos estos procedimientos se describen en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2017).

Para analizar los datos de biomasa del zooplancton se emplearon métodos volumétricos y gravimétricos descritos en Postel et al. (2000), mientras que para el conteo y cálculo de la densidad de organismos, tanto de zooplancton como de fitoplancton, se utilizaron los métodos sugeridos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2017).

### Fase de laboratorio:

En el laboratorio del Área de Protección del Medio Marino (APROMM) del CIOH Pacífico, se cuantificaron las células de fitoplancton en una cámara Sedgwick-Rafter de 1 ml, utilizando un microscopio invertido Leica DMi1 con objetivos de 10X y 40X para observar las células con mayor detalle cuando era necesario. Se realizaron tres réplicas por muestra y se identificaron las especies utilizando claves taxonómicas y descripciones de Cupp (1943); Balech et al., (1988); Hasle y Syvertsen (1997) y Morales-Pulido y Aké-Castillo (2019). Además, se verificó el estado taxonómico de las especies, autores y sinonimia mediante la base de datos Algaebase (Guiry y Guiry, 2022). El análisis de la diversidad del Ictioplancton estuvo a cargo de la Dirección Territorial del Pacífico de Parques Nacionales Naturales la cual se llevó a cabo en las instalaciones de su laboratorio.

### Manejo de datos y Análisis estadístico:

Para asegurar la calidad de los datos se realizó una revisión previa de los datos primarios y secundarios para evitar errores de transcripción al momento pasar de una hoja de datos primarios al Darwin-Core. Luego, los nombres científicos de las especies fueron corroborados en Algaebase (Guiry y Guiry, 2022). La información se depuró (limpieza de datos) con la herramienta "taxon match" del registro mundial de especies marinas (WoRMS, 2022) y el software OpenRefine versión 3.4.1 (Verborgh y De Wilde, 2013).

### Análisis estadístico:

Para los datos físicos obtenidos con la sonda CTD-O SeaBird 19 v se construyeron perfiles de cada variable para cada estación en cada rango de marea, con el objetivo de comparar el comportamiento de la temperatura, salinidad y densidad entre los cambios mareales y los transectos.



Se realizaron análisis estadísticos y gráficos a las variables fisicoquímicas utilizando el paquete "ggplot2" (Wickham, 2016). Se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilks y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Sin embargo, ninguna de las variables cumplió con ambos criterios ( $p < 0,05$ ). Para describir el comportamiento espacial y temporal de las variables, se rasterizaron los datos y se elaboraron mapas comparativos de la marea baja y alta de cada variable. Se realizaron pruebas de autocorrelación espacial usando el cálculo del índice de Moran global y local a través del paquete "spdep" de R (Bivand & Wong, 2018). Además, para reducir la complejidad del conjunto de datos multivariados obtenidos a partir de los análisis fisicoquímicos, se realizó un análisis de componentes principales (PCA). El objetivo de este análisis fue transformar las variables originales en un conjunto más pequeño de variables no correlacionadas, que explicaran la mayor cantidad de variación en los datos originales. Esto permitió visualizar las relaciones entre los datos de manera más sencilla, identificar patrones o agrupaciones en los datos y determinar qué variables tuvieron más influencia en las diferencias observadas entre las muestras. El análisis de PCA se realizó utilizando el paquete "factoextra" en R (Kassambara y Mundt, 2020) y se tuvieron en cuenta las categorías espaciales y temporales determinadas previamente, como Mareas, Transectos y Sectores. Todos los análisis estadísticos descriptivos se llevaron a cabo con el paquete de R "tidyverse" (v1.3.0; Wickham et al., 2019).

Con el objetivo de comparar las categorías espaciales y temporales planteadas a partir de los datos fisicoquímicos, se evaluaron las diferencias utilizando una técnica multivariada llamada Multi Response Permutation Procedure. MRPP utiliza una prueba no paramétrica que compara la disimilitud promedio dentro de los grupos con la disimilitud promedio entre los grupos. Si las disimilitudes entre grupos son mayores que las disimilitudes dentro de los grupos, entonces se considera que hay una diferencia significativa entre los grupos.

Para realizar los análisis del ensamble de fitoplancton e ictioplancton, se utilizaron los cálculos de los números de Hill estos se usan para calcular una medida de diversidad, que indica cuántas especies diferentes hay en una comunidad y cómo se distribuyen. La fórmula para calcular el número de Hill incluye un parámetro  $q$ , que determina la sensibilidad del cálculo a la presencia de especies raras. Un valor alto de  $q$  da más peso a las especies raras, mientras que un valor bajo de  $q$  da más peso a las especies comunes.

- Número de Hill de orden cero ( $q=0$ ): Es la riqueza de especies, es decir, el número total de especies presentes en una muestra o comunidad. La diversidad de orden cero ( $q/0$ ) es completamente insensible a las frecuencias de especies y es más conocida como riqueza de especies (Jost, 2006) .
- Número de Hill de primer orden ( $q=1$ ): Es la exponencial de la entropía de Shannon, y se define como  $\exp(H)$ , donde  $H = - \sum (\pi_i * \ln(\pi_i))$ , donde  $\pi_i$  es la proporción de individuos de la  $i$ -ésima especie. El número de Hill de primer orden se interpreta como el número efectivo de especies en una comunidad. Este índice es sensible a las especies más comunes (Jost, 2006).
- Número de Hill de segundo orden ( $q=2$ ): Es la inversa de la suma ponderada de las proporciones de las especies elevadas a la segunda potencia, es decir,  $1 / \sum (\pi_i^2)$ . Este número de Hill se interpreta como la diversidad de orden superior, y se utiliza para tener en cuenta tanto la riqueza como la equitatividad de la comunidad. Es más sensible a las especies raras (Jost, 2006).

Para el cálculo de estos índices se usó el paquete de R iNEXT (Hsieh et al. 2015). El paquete iNEXT en R se puede utilizar para realizar una variedad de análisis relacionados con la diversidad. Algunos ejemplos de análisis que se pueden realizar con el paquete iNEXT incluyen el cálculo y la representación gráfica de curvas de rarefacción y extrapolación basadas en el tamaño de la



muestra y la cobertura, la estimación de la diversidad de especies en muestras incompletas, la evaluación de patrones de diversidad alfa y beta en diferentes comunidades, y el cálculo de los números de Hill de orden q para la riqueza de especies, la diversidad de Shannon y la diversidad de Simpson (Hsieh et al. 2015).. El paquete también se puede utilizar para calcular estimaciones de diversidad rarefactadas y extrapoladas con la completitud de la muestra y generar curvas de acumulación de especies raras.

Después de obtener las medidas de diversidad para los tres órdenes, tanto la observada como la esperada, se llevaron a cabo análisis para determinar posibles diferencias entre las categorías espaciales y temporales definidas para el estudio. Se empleó la técnica multivariada del MRPP para estos análisis.

Para visualizar el grado de similitud entre las categorías en función de la abundancia de las especies de fitoplancton e Ictioplancton, se realizó un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (nDMS) utilizando el paquete “vegan” de R (Oksanen et al. 2023). Una vez obtenidas estas métricas se llevaron a cabo pruebas de correlación entre los diferentes niveles de diversidad entre el fitoplancton y el ictioplancton utilizando la prueba parcial de Mantel, debido a que la mayoría de las métricas de la diversidad utilizada presentaron autocorrelación espacial. Estos cálculos se realizaron utilizando el paquete de R “vegan” (Oksanen et al., 2022).

Para determinar las relaciones entre las variables hidrográficas y la biodiversidad, se usó la prueba parcial de Mantel debido a la constante estructura espacial encontrada en todas las variables, todos los cálculos se realizaron el paquete “vegan” de R (Oksanen et al., 2022).

Para efectos de reproducibilidad de los análisis, se creó un repositorio público en GitHub con los scripts creados para llevar a cabo todos los análisis y la visualización de datos. Al repositorio se puede acceder en la siguiente dirección: [https://github.com/ChrisBermudezR/Ictioplancton\\_ExPacifico2021](https://github.com/ChrisBermudezR/Ictioplancton_ExPacifico2021)

## 6 Resultados

### 6.1 Análisis fisicoquímico

#### Análisis de las variables en la profundidad

El análisis de la visualización de los datos obtenidos por la sonda CTD-O SeaBird 19 v Plus muestran que no se observan diferencias entre los transectos para ninguna de las variables (Figura 3). Se realizó una prueba MRPP para analizar la relación entre la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y densidad del agua medida con el CTDO, en tres transectos diferentes: Amarales, Guascama y Sanquianga. La prueba MRPP mostró una significativa diferencia en la composición de las variables fisicoquímicas del agua entre los tres transectos ( $\delta = 6.613$ ,  $p = 0.001$ ). La disimilitud se midió utilizando la distancia euclídea y se realizó un total de 999 permutaciones. Los pesos para los grupos se basaron en el número de observaciones en cada grupo. Los resultados indican que la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y densidad del agua son diferentes entre los tres transectos, lo que sugiere que hay una variación significativa en las condiciones fisicoquímicas del agua en el área de estudio.

La prueba de Kruskal-Wallis indica que no se encontraron diferencias significativas entre las medianas de la temperatura tomada entre los transectos ( $\chi^2 = 2678$ ,  $gl = 2656$ ,  $p = 0.3781$ ). En otras palabras, los valores de la temperatura parecen ser similares en todos los transectos.

Además, se realizó un análisis post hoc mediante la prueba de Wilcoxon rank sum test para comparar las medianas de pares de los transectos. Los resultados indican que hay diferencias significativas en las medianas entre los grupos Guascama y Amarales ( $p < 0.001$ ) y entre los



grupos Sanquianga y Amarales ( $p < 0.001$ ), pero no hay diferencias significativas entre los grupos Guascama y Sanquianga ( $p = 0.4$ ). Es importante destacar que, para controlar el error tipo I, se utilizó una corrección de Bonferroni para ajustar los valores de  $p$ .

Para la variable Salinidad ( $\chi^2 = 2731$ , gl = 2683,  $p = 0.2547$ ) no hay una diferencia significativa entre los transectos. Sin embargo, en el análisis post hoc se observa una diferencia significativa ( $p < 0.001$ ) entre el transecto Amarales y los otros dos grupos en términos de Salinidad.

Para la variable Oxígeno lo que sugiere la prueba es que no hay una diferencia significativa entre los transectos ( $\chi^2 = 2619.6$ , gl = 2591,  $p = 0.3425$ ). Sin embargo, en el análisis post hoc se observa una diferencia significativa ( $p < 0.001$ ) entre el transecto Sanquianga y los otros dos transectos en términos de Oxígeno.

Para la variable Densidad, lo que sugiere la prueba es que no hay una diferencia significativa entre los transectos ( $\chi^2 = 2761.1$ , gl = 2739,  $p = 0.3793$ ). Sin embargo, en el análisis post hoc se observa una diferencia significativa ( $p < 0.001$ ) entre el transecto Amarales y el transecto Sanquianga en términos de Densidad, sin embargo, entre Guascama y el resto de transecto la prueba no detecta diferencias con un  $p < 0.001$  y con un  $p < 0.05$ .

Los resultados de la prueba MRPP para comparar los sectores, mostraron que el delta observado fue de 6.288, mientras que el delta esperado fue de 6.757, lo que indica que existe una diferencia significativa en la composición de las variables entre los dos sectores. El índice de concordancia corregido por azar A fue de 0.06953, lo que sugiere que la similitud dentro de los grupos es mayor que la esperada al azar. Además, el valor  $p$  de la prueba fue de 0.001, lo que indica que la diferencia observada entre los dos sectores no se debe al azar. En conclusión, se encontró que las variables estudiadas difieren significativamente entre el sector costero y el oceánico, lo que sugiere que estos sectores pueden ser considerados como distintas unidades ambientales. Los resultados de la prueba Wilcoxon confirman que existe una diferencia significativa en las temperaturas ( $W = 635860$ ,  $p < 0.0001$ ), la salinidad ( $W = 118698$ ,  $p < 0.0001$ ), el oxígeno disuelto ( $W = 397442$ ,  $p < 0.0001$ ), y la densidad ( $W = 112651$ ,  $p < 0.0001$ ) entre ambos sectores.

Para las mareas, la prueba de MRPP, mostró que existen diferencias significativas entre estas basadas en todas las variables mencionadas (Figura 5). El índice de concordancia corregido por azar dentro de los grupos A es de 0.002952, lo que sugiere que hay muy poca concordancia dentro de los grupos en comparación con lo que cabría esperar al azar. El delta observado es de 6.737 y el delta esperado es de 6.757. Esto significa que la disimilitud entre los grupos es menor de lo que se esperaría al azar. El valor de significancia para delta es de 0.001, lo que indica que hay una diferencia significativa entre los grupos. Además, se han realizado 999 permutaciones y se ha utilizado una prueba libre. Los resultados de la prueba Wilcoxon confirman que existe una diferencia significativa en las temperaturas ( $W = 885737$ ,  $p < 0.0001$ ) entre las mareas (Figura 5), sin embargo, para la salinidad ( $W = 999149$ ,  $p = 0.8605$ ), el oxígeno disuelto ( $W = 1000700$ ,  $p = 0.8046$ ), y la densidad ( $W = 915519$ ,  $p = 0.3823$ ), no se encontraron diferencias significativas. Es por esta razón que la prueba de MRPP para las mareas mostró un índice de concordancia demasiado bajo.

En la Figura 6 se puede observar de manera resumida el comportamiento de todas estas variables en todas las categorías designadas para este estudio. Lo que refleja esta gráfica es que las condiciones para la temperatura, salinidad, oxígenos disuelto y densidad no presentan cambios significativos en la columna de agua entre las mareas y entre los transectos, y una leve diferenciación entre los sectores costeros y oceánico sin embargo con los análisis anteriores no se lograron comprobar estas diferencias aparentes.

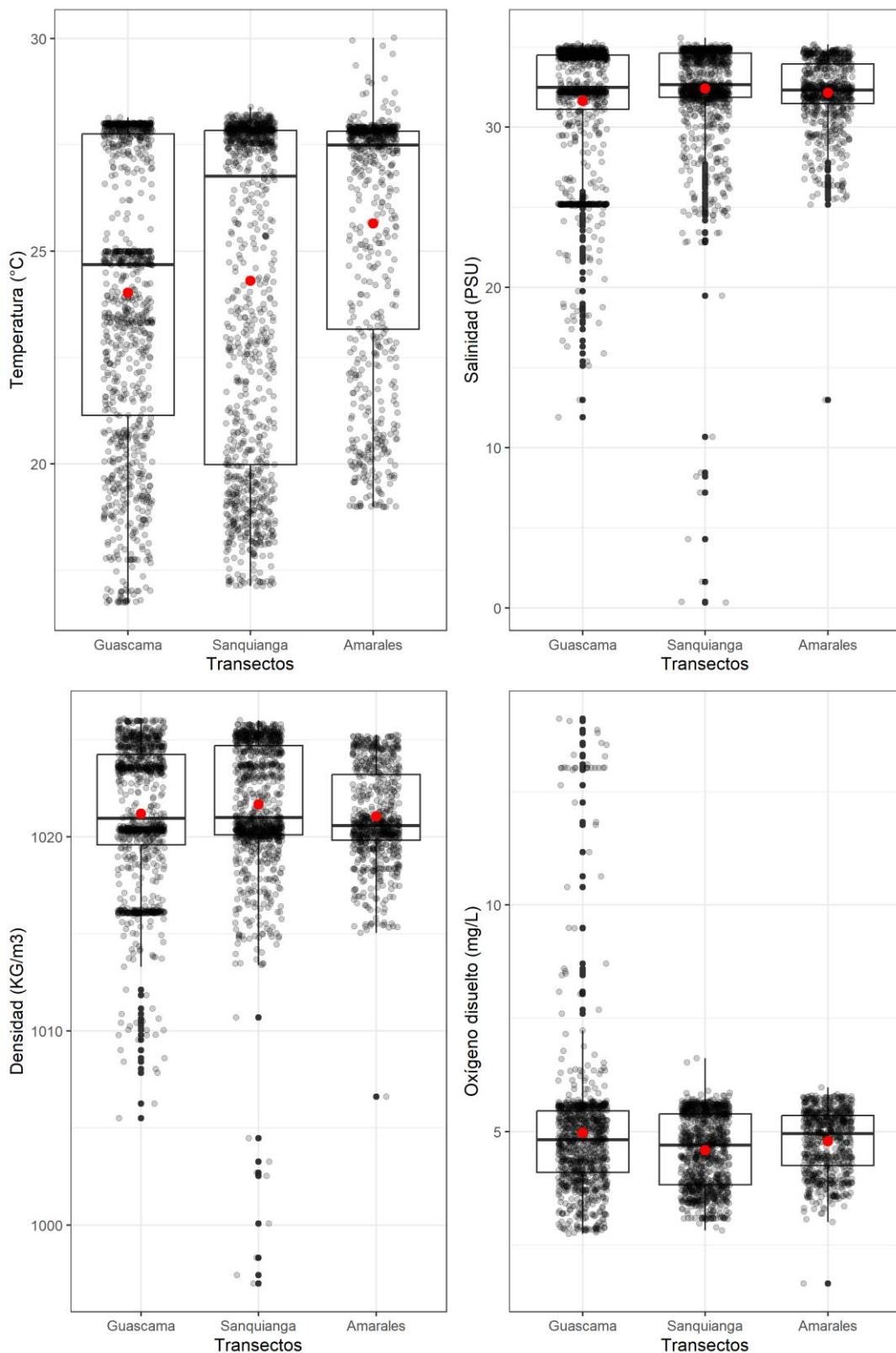


Figura 3. Diagramas de cajas de los datos de las variables de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidad (PSU), oxígeno disuelto ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) y densidad del agua ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) mostrando la comparación entre los transectos Amarales, Guascama y Sanquianga de la subregión Sanquianga-Gorgona, frente al delta del río Patía.

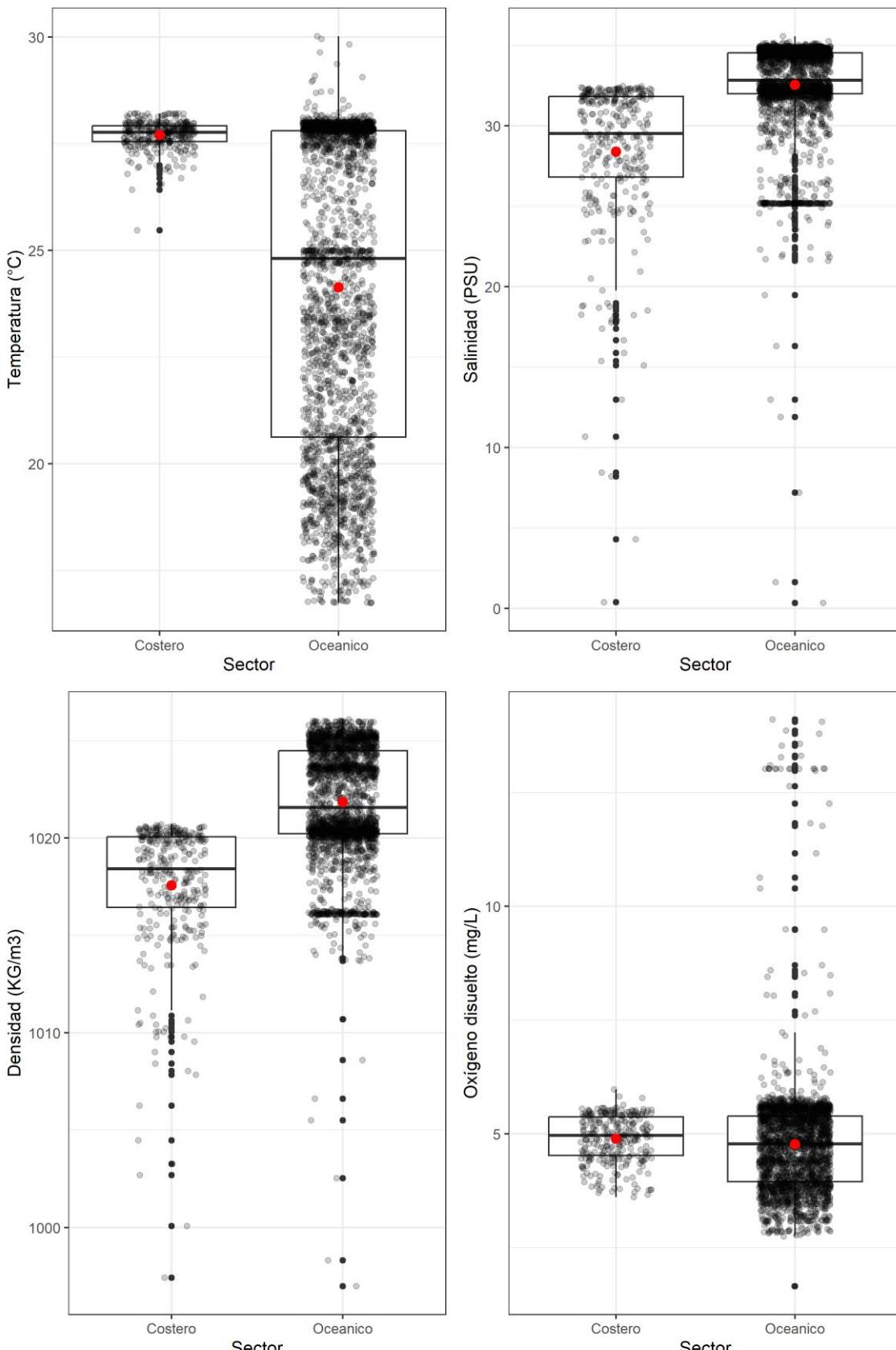


Figura 4. Diagramas de cajas de los datos de las variables de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidad (PSU), oxígeno disuelto ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) y densidad del agua ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) mostrando la comparación entre el sector costero y el sector oceánico de la subregión Sanquianga-Gorgona, frente al delta del río Patía.

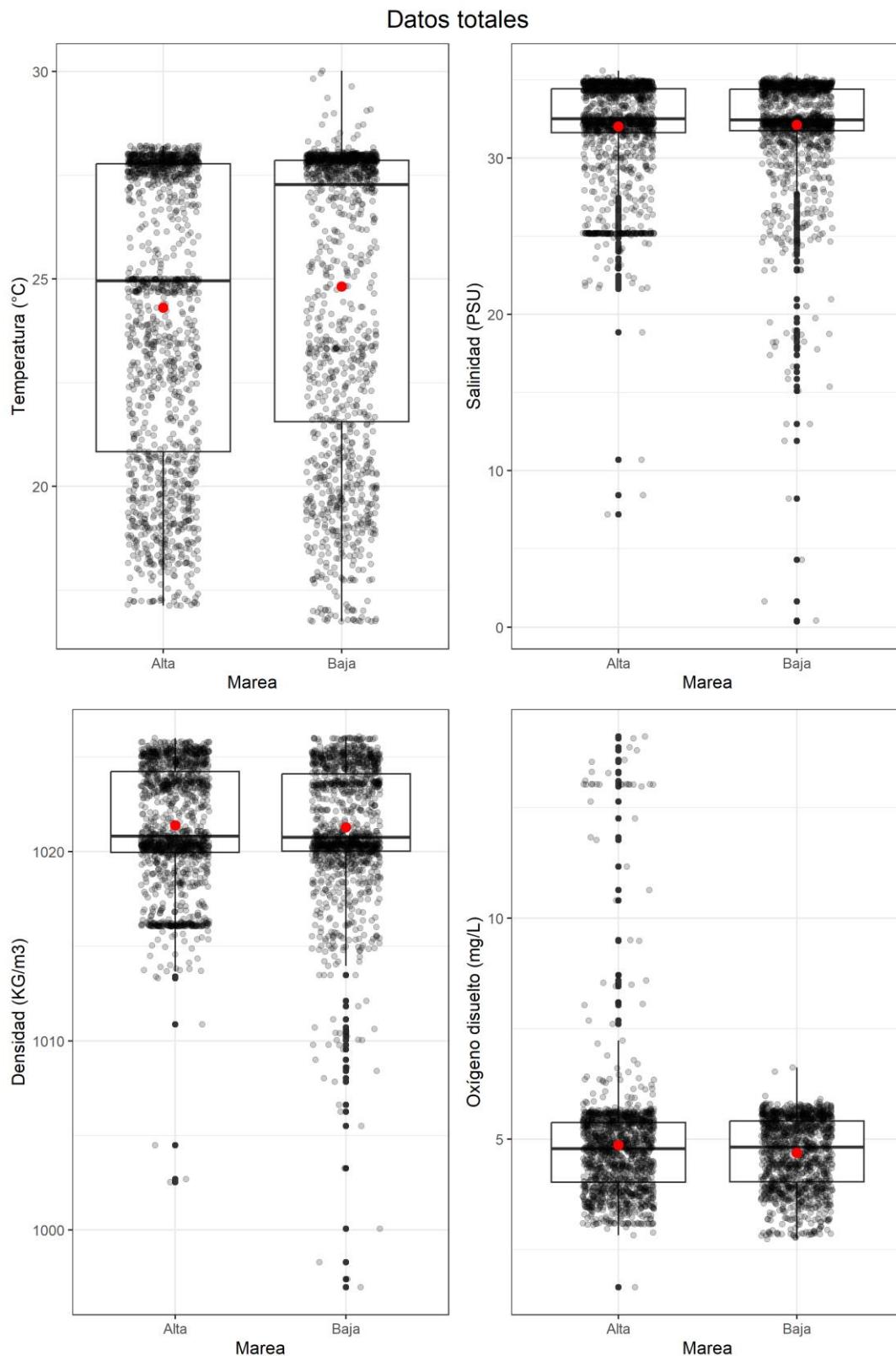


Figura 5. Diagramas de cajas de los datos de las variables de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidad (PSU), oxígeno disuelto ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) y densidad del agua ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) mostrando la comparación entre la marea alta y la marea baja de la subregión Sanquianga-Gorgona, frente al delta del río Patía.

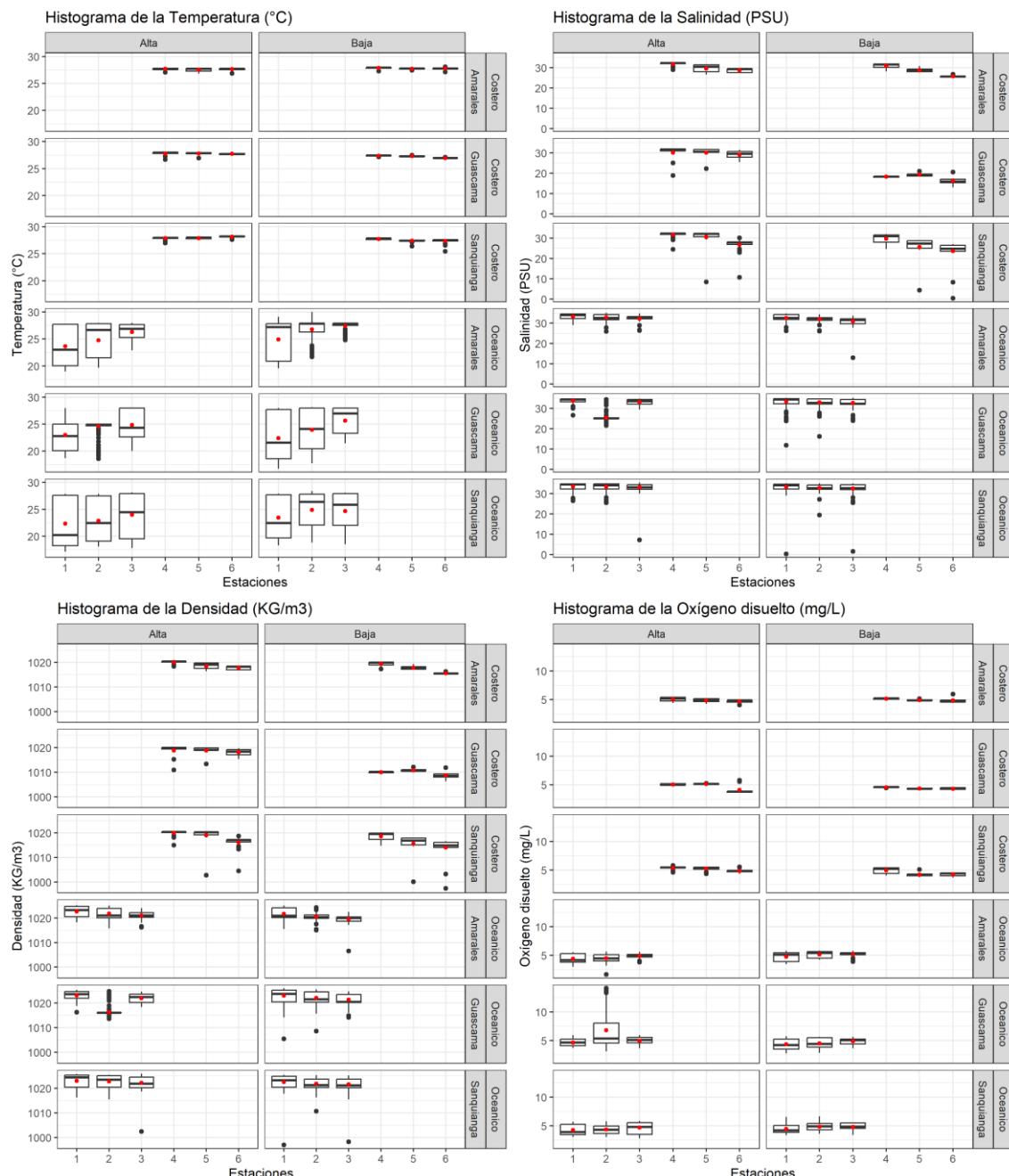


Figura 6. Diagramas de cajas para cada uno de los sectores, transectos y mareas discriminados por cada estación de muestro mostrando el comportamiento de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidad (PSU), oxígeno disuelto (mg.L<sup>-1</sup>) y densidad del agua (kg.m<sup>-3</sup>).



## Análisis de las variables en la superficie

Durante el período de tiempo de la toma de muestras, se detectaron diferencias significativas para la variables en general, entre la marea alta y la marea baja en el área mediante la prueba de MRPP ( $A = 0.042, p < 0.05$ ), así como entre los diferentes sectores ( $A = 0.11, p < 0.01$ ) y para los transectos ( $A = 0.05302, p < 0.05$ ).

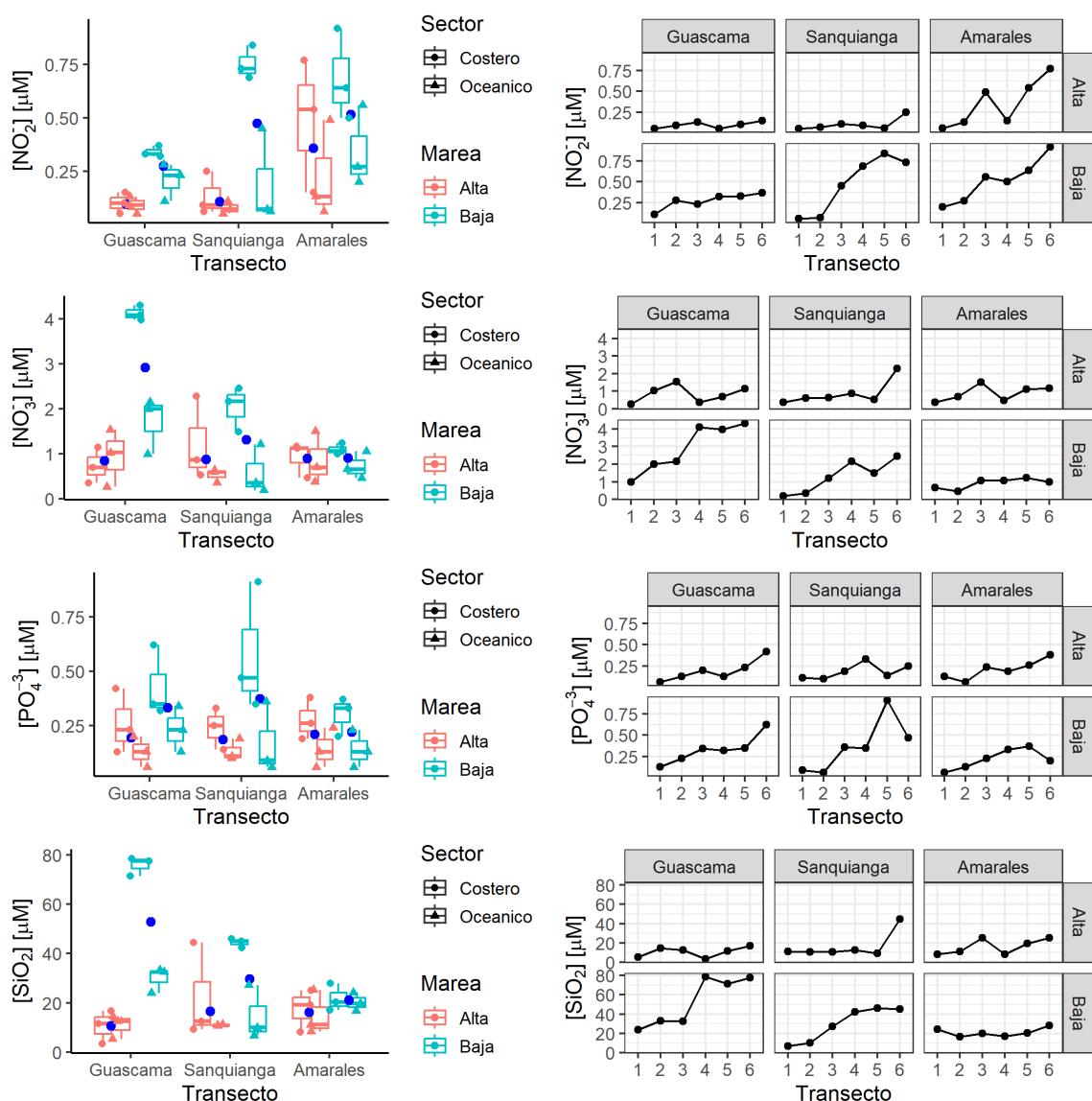


Figura 7. Diagrama de cajas y líneas mostrando la distribución de las concentraciones de nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos entre los períodosmareales, los sectores y los transectos de las bocanas de delta del río Sanquianga.



Los nitritos en marea alta presentaron un mínimo de concentración de 0.05  $\mu\text{M}$ , una mediana de 0.1  $\mu\text{M}$  y un máximo de concentración de 0.77  $\mu\text{M}$ . Para la marea baja, el mínimo de concentración fue de 0.24  $\mu\text{M}$ , una mediana de 0.35  $\mu\text{M}$  y un máximo de concentración de 0.92  $\mu\text{M}$  (Figura 7). Los nitritos tendieron a presentar una mayor concentración en la bocana Amarales en marea baja seguida de la bocana Sanquianga también en marea baja (Figura 8), la prueba local de Moran mostró una varianza alta para la bocana Amarales más que para el resto de las bocas. Se encontró una correlación espacial global positiva y significativa para ambos períodos mareales (Marea Alta I de Moran= 0.33 p <0.01; Marea Baja I de Moran = 0.35 p <0.01).

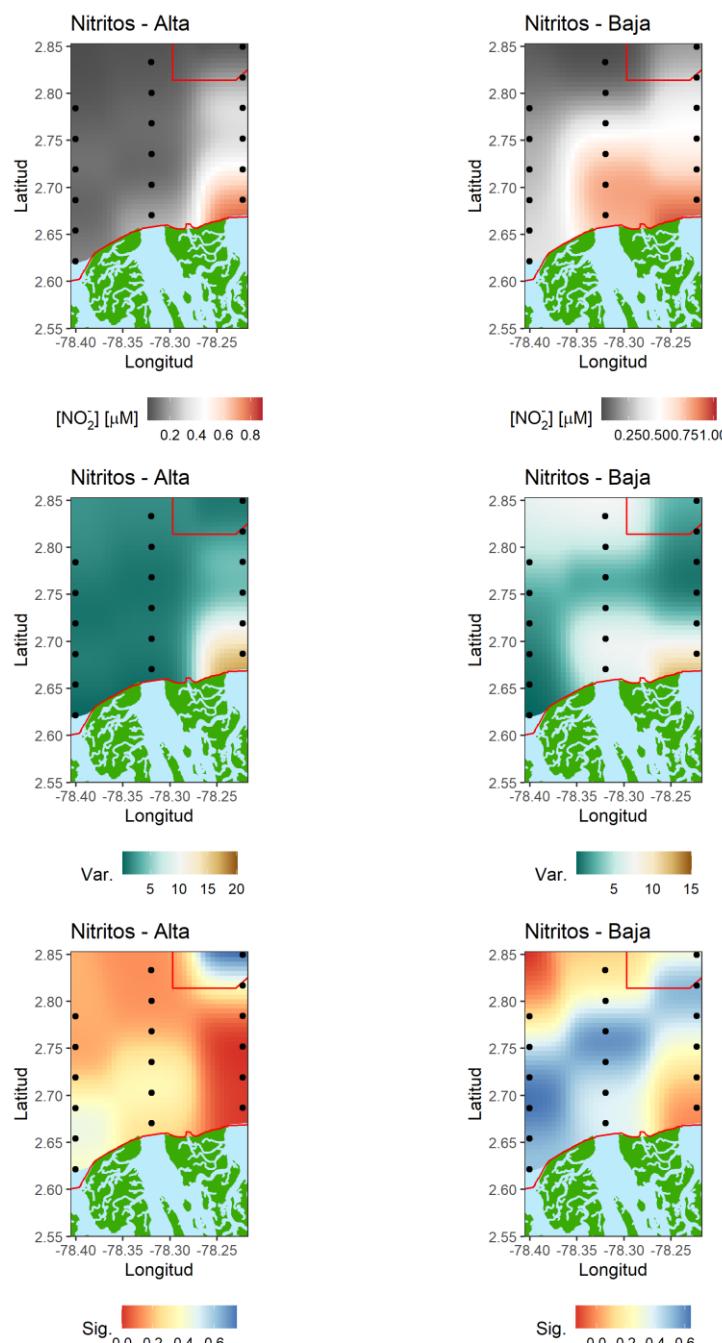


Figura 8. Distribución de la concentración de nitritos  $[\text{NO}_2^-]$  [ $\mu\text{M}$ ] en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.



Los nitratos en marea alta presentaron un mínimo de concentración de 0.27  $\mu\text{M}$ , una mediana de 0.7  $\mu\text{M}$  y un máximo de concentración de 2.28  $\mu\text{M}$ . Para la marea baja, el mínimo de concentración fue de 0.19  $\mu\text{M}$ , una mediana de 1.22  $\mu\text{M}$  y un máximo de concentración de 4.3  $\mu\text{M}$ . Estos tendieron a presentar una mayor concentración en marea baja en la bocana Guascama detectándose una alta varianza en esta bocana con un alto nivel de significancia y Sanquianga presentando una correlación espacial global positiva y significativa ( $I$  de Moran = 0.55  $p < 0.01$ ) mientras que, para la marea alta, no se encontró una correlación espacial significativa ( $I$  de Moran = -0.05  $p = 0.49$ ) observándose una mayor aleatoriedad en su distribución (Figura 9).

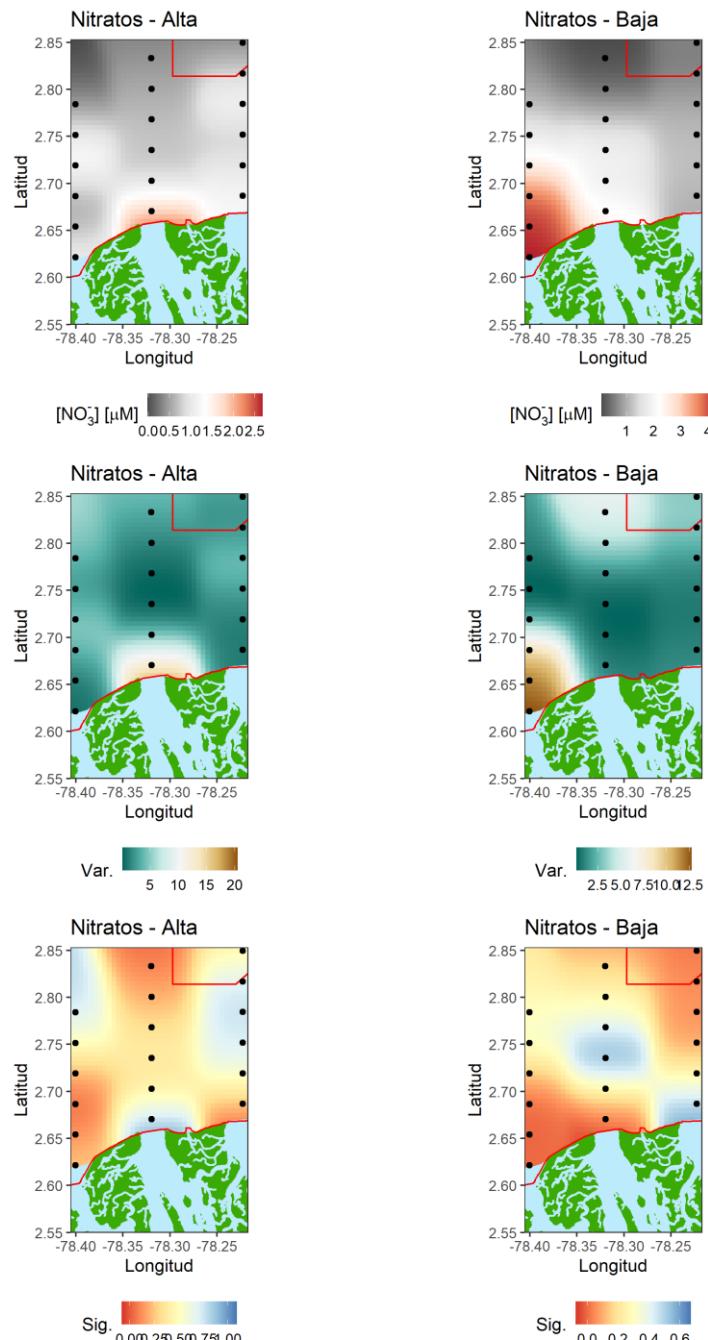


Figura 9. Distribución de la concentración de nitratos [ $\text{NO}_3^-$ ] [ $\mu\text{M}$ ] en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

Los fosfatos en marea alta presentaron un mínimo de concentración de 0.06  $\mu\text{M}$ , una mediana de 0.19  $\mu\text{M}$  y un máximo de concentración de 0.42  $\mu\text{M}$ . Para la marea baja, el mínimo de



concentración fue de 0.06  $\mu\text{M}$ , una mediana de 0.32  $\mu\text{M}$  y un máximo de concentración de 0.91  $\mu\text{M}$ . Espacialmente la mayor concentración se encontró en la bocana Sanquianga durante la marea baja presentando una correlación espacial positiva y significativa ( $I$  de Moran = 0.30  $p < 0.01$ ) pero la distribución de estos en marea alta no presentó una estructura espacial ( $I$  de Moran = 0.09  $p = 0.1$ ) (Figura 10).

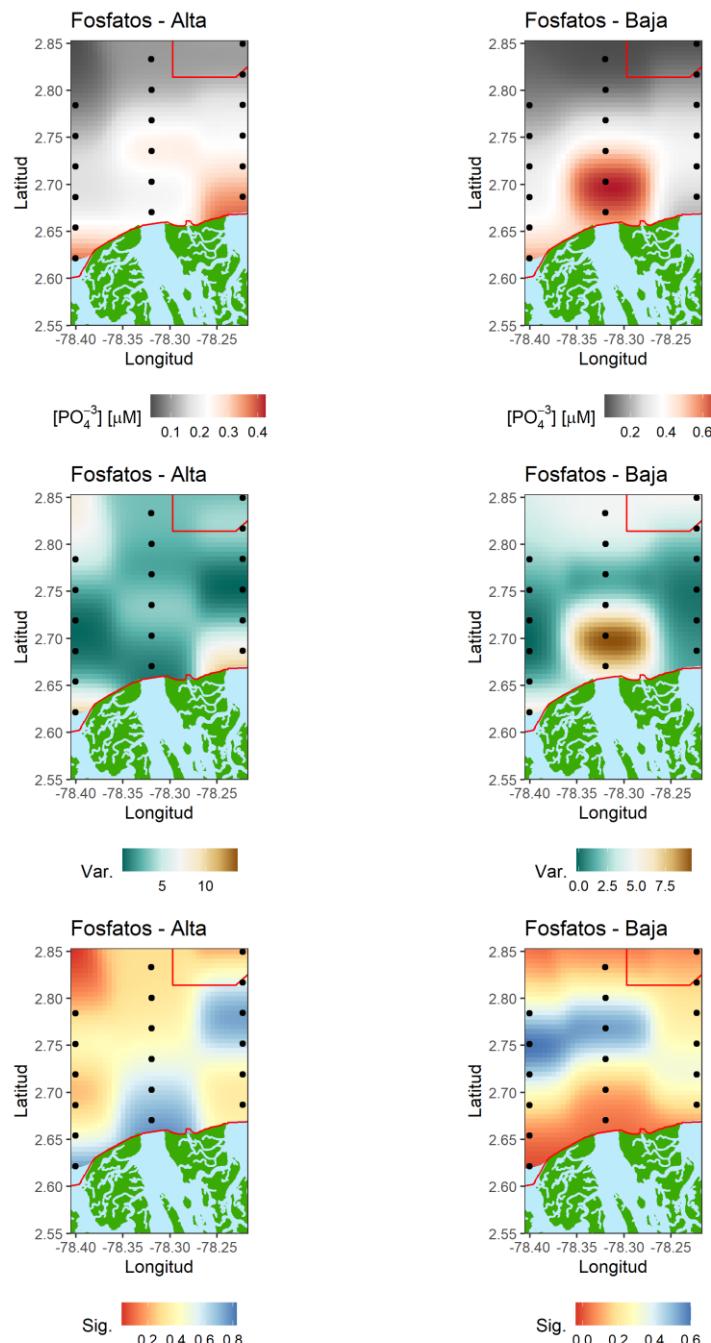


Figura 10. Distribución de la concentración de fosfatos [ $\text{PO}_4^{3-}$ ] $[\mu\text{M}]$  en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

Los silicatos presentaron la mayor concentración durante la marea baja en la bocana Guascama durante la marea baja con un valor de 78.47  $\mu\text{M}$  con una mediana de 27.64  $\mu\text{M}$  y una mínima concentración de 6.86  $\mu\text{M}$ . En marea alta se registró una mediana de 11.49  $\mu\text{M}$ , un mínimo de 3.51



$\mu\text{M}$  y un máximo de 44.44  $\mu\text{M}$ . Se encontró correlación espacial significativa en la distribución de los silicatos en marea baja ( $I$  de Moran = 0.53  $p < 0.01$ ) pero no se encontró correlación espacial en la marea alta ( $I$  de Moran = -0.05  $p = 0.47$ ).

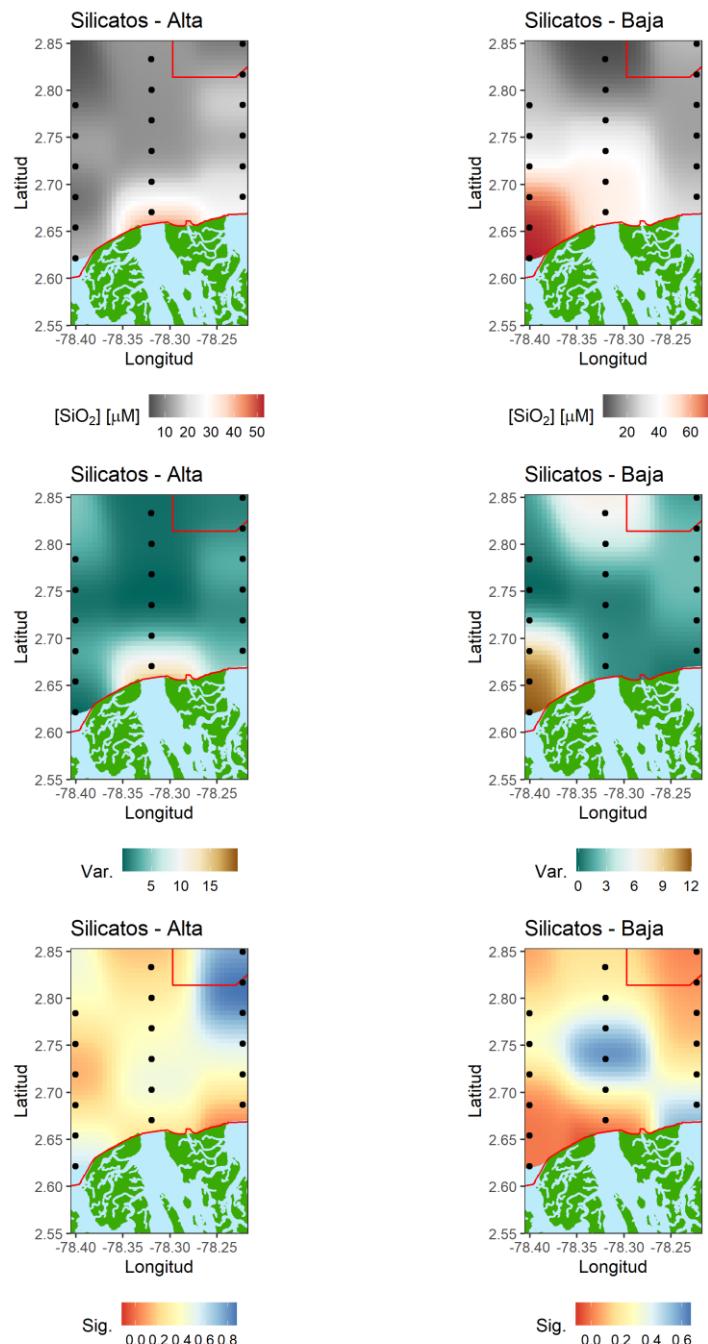


Figura 11. Distribución de la concentración de silicatos  $[\text{SiO}_2]$  [ $\mu\text{M}$ ] en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

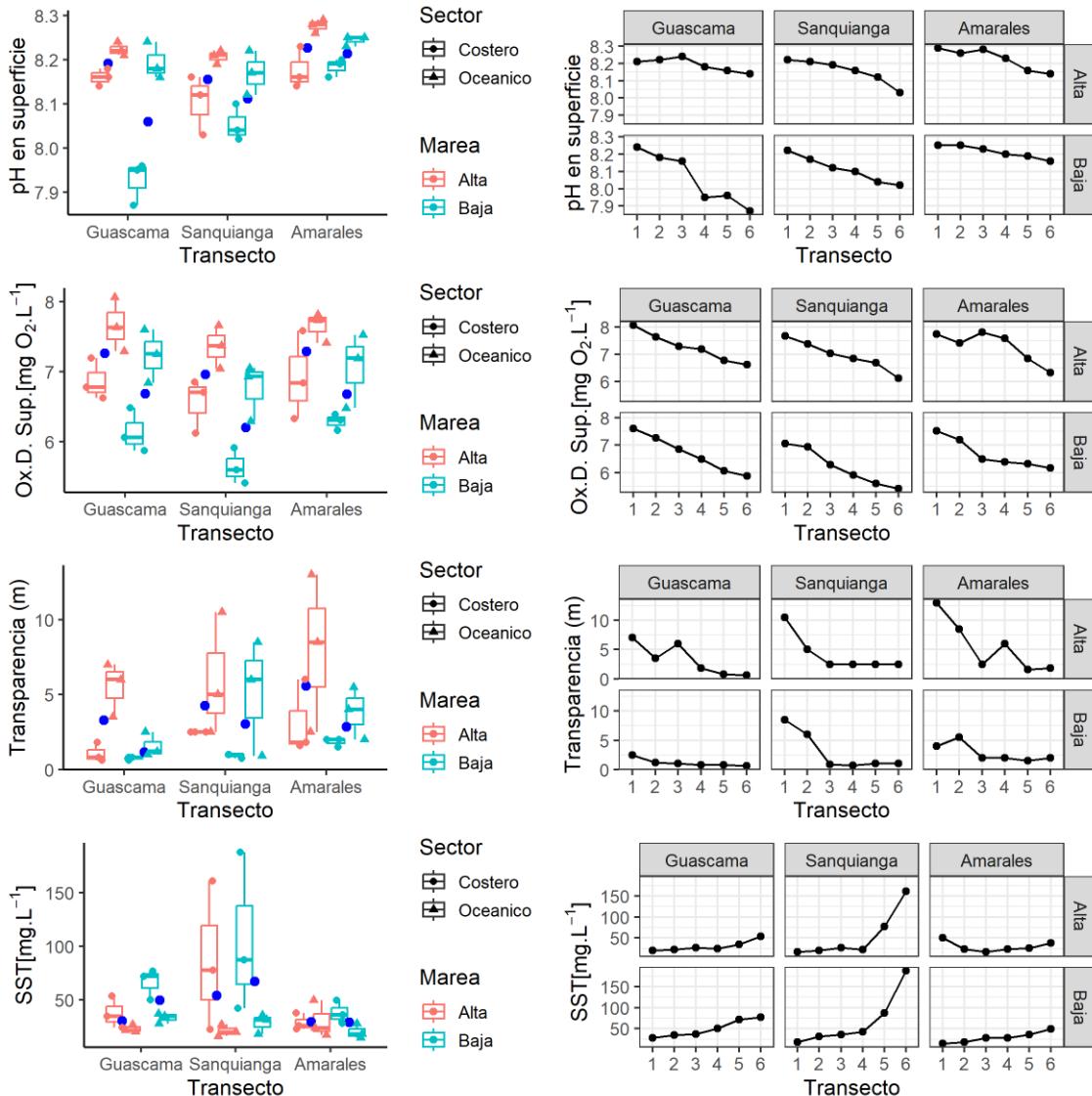


Figura 12. Diagrama de cajas y líneas mostrando la distribución de las concentraciones del pH, el oxígeno disuelto en superficie, la transparencia y los sólidos suspendidos totales entre los períodos mareales, los sectores y los transectos de las bocanas de delta del río Sanquianga.

El pH más básico registrado se dio tanto en marea alta como en marea baja con una mediana similar de 8.2. El valor más ácido registrado fue de 7.8. La mayor concentración de oxígeno disuelto se encontró en marea alta en el sector oceánico con un valor de 8.06 mg.L<sup>-1</sup> y se presentó una tendencia a disminuir esta concentración hacia las bocanas (Figura 12), alcanzando concentraciones de 6.08 mg.L<sup>-1</sup> en marea baja y 6.79 mg.L<sup>-1</sup> en marea alta. La mediana para la marea alta fue de 7.2 mg.L<sup>-1</sup> y para marea baja fue de 6.435 mg.L<sup>-1</sup>.

Para ambas mareas se encontró una estructura espacial agregada y muy significativa mareales (Marea Alta I de Moran= 0.34 p <0.01; Marea Baja I de Moran = 0.55 p <0.01) presentándose un fuerte descenso en la bocana guascama, ubicándose en esta área la mayor varianza y significancia de la prueba local de Moran (Figura 13).

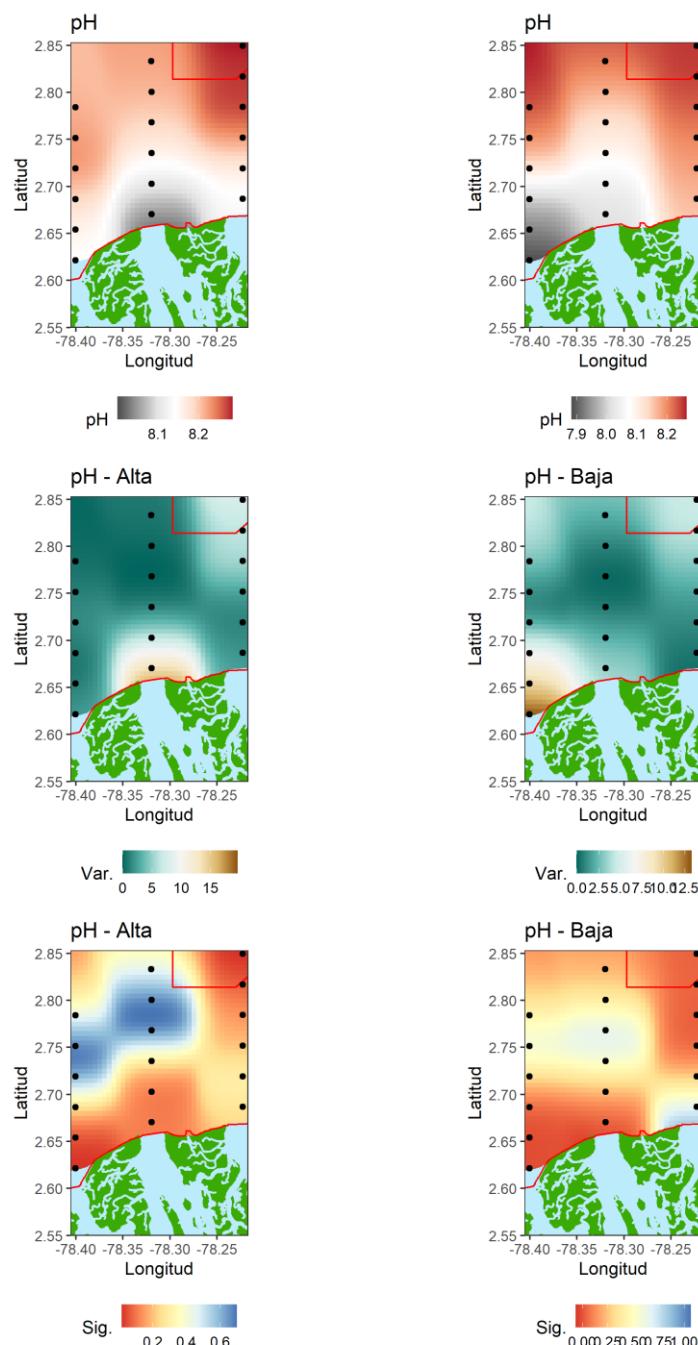


Figura 13. Distribución de la concentración del pH en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.



La transparencia con el alcance del disco Secchi mostró una tendencia similar a la encontrada con el oxígeno disuelto, a medida que las estaciones de muestreo se acercan a la costa la transparencia es mayor y esto a su vez se relaciona con los sólidos suspendidos. En la marea alta se obtuvo el mayor valor de profundidad de transparencia de aproximadamente 13 metros en el transecto de Amarales, y una transparencia de aproximadamente de 0.6 metros en todo el sector costero. La mediana para la marea alta fue de 1.97 metros y para la marea baja 1.35 metros.

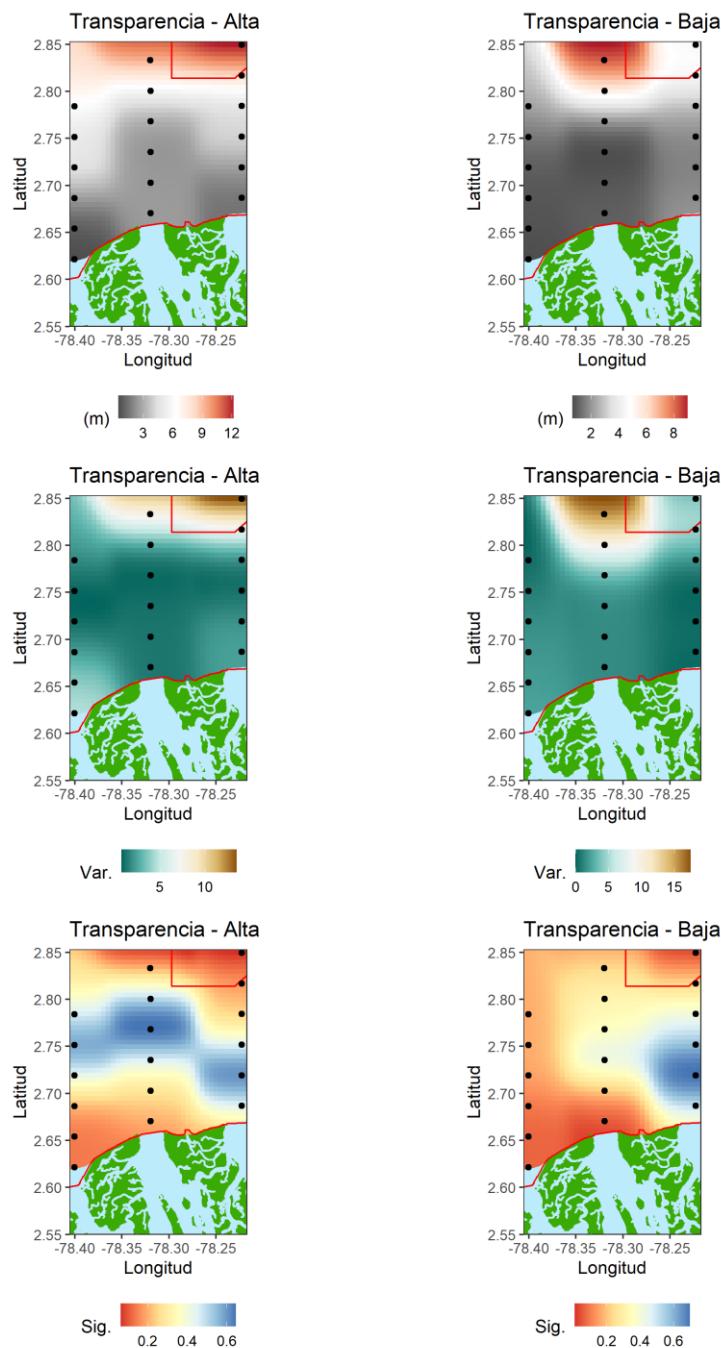


Figura 14. Distribución de la transparencia en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

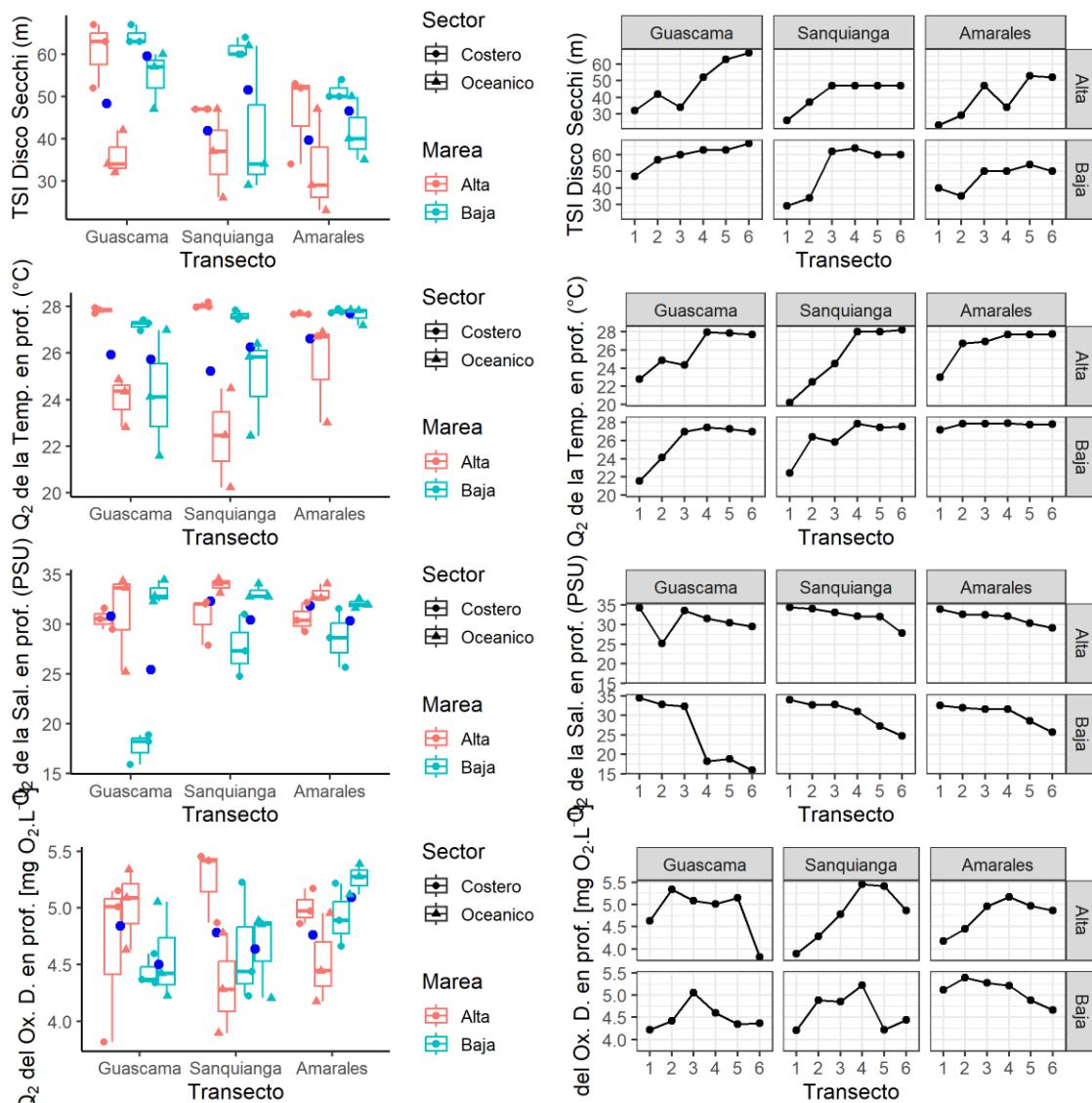


Figura 15. Diagrama de cajas y líneas mostrando la distribución del TSI del disco Secchi, la mediana de la temperatura en profundidad, la mediana de la salinidad en profundidad y la mediana del oxígeno disuelto en profundidad entre los períodos mareas, los sectores y los transectos de las bocanas de delta del río Sanquianga.

La mediana del TSI en marea alta fue de 47 con un máximo de 67 y un mínimo de 23, para la marea baja el máximo fue de 67 y el mínimo fue de 29 con una mediana de 55 (Figura 15). La tendencia general del TSI fue la de presentar valores más altos en la costa que hacia la parte oceánica. El TSI presentó mayores valores hacia el sector costero sobre todo en marea baja. En ambas mareas se encontró una correlación espacial positiva y altamente significativa (Marea Alta I de Moran= 0.29 p <0.01; Marea Baja I de Moran = 0.27 p <0.01), la mayor fuente de variación en marea alta se encontró hacia la bocana de Guascama, sin embargo, en la marea baja la mayor fuente de variación se encontró hacia el sector oceánico (Figura 16).

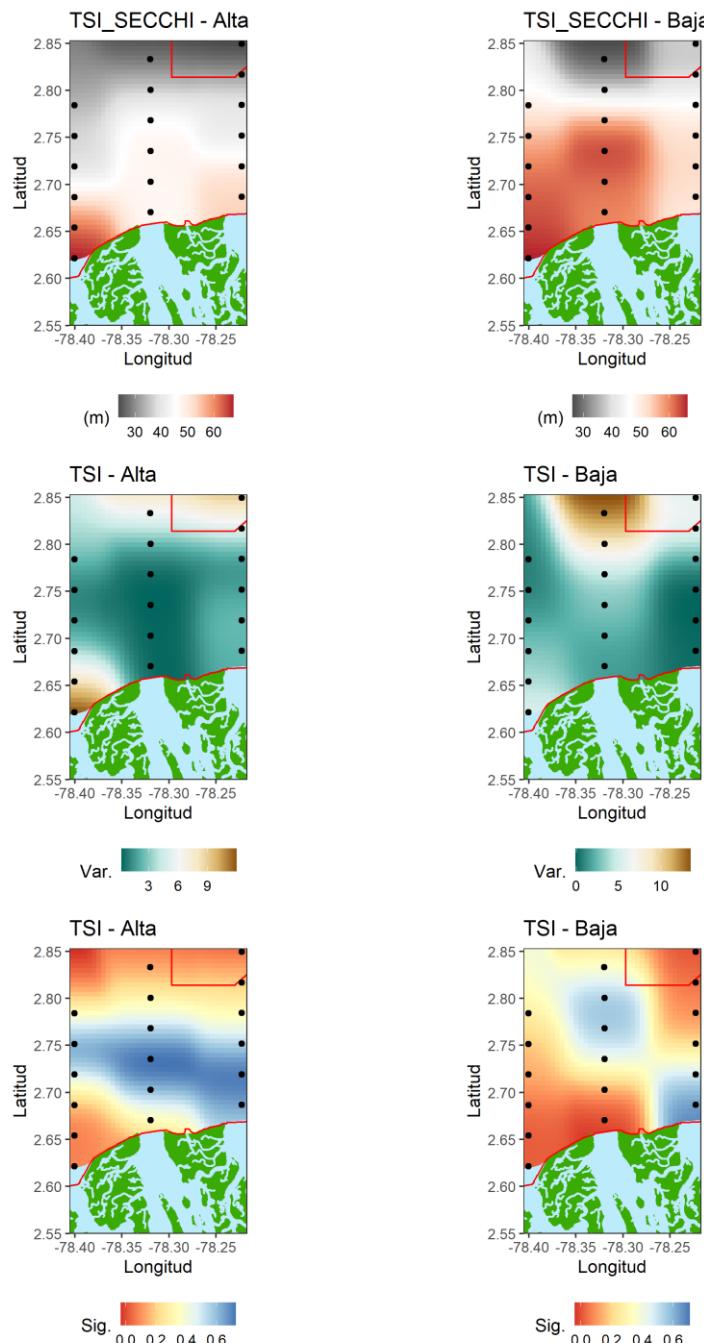


Figura 16. Distribución del TSI en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

La mediana de la temperatura medida en la profundidad mostró una tendencia a aumentar hacia la parte costera, en la bocana de Amarales presentó una estabilización sobre todo en marea baja (Figura 15). El valor mínimo de la mediana en marea alta fue 20.22 °C con un máximo de 28.19 °C, en marea baja, el valor máximo de la mediana fue de 27.9 °C y el mínimo de 21.58 °C. esta variable presentó correlación espacial global positiva y significativa para ambos períodos mareales significativa (Marea Alta I de Moran= 0.44 p <0.01; Marea Baja I de Moran = 0.34 p <0.01), presentando la principal fuente de variación hacia el sector oceánico en ambas mareas (Figura 17).

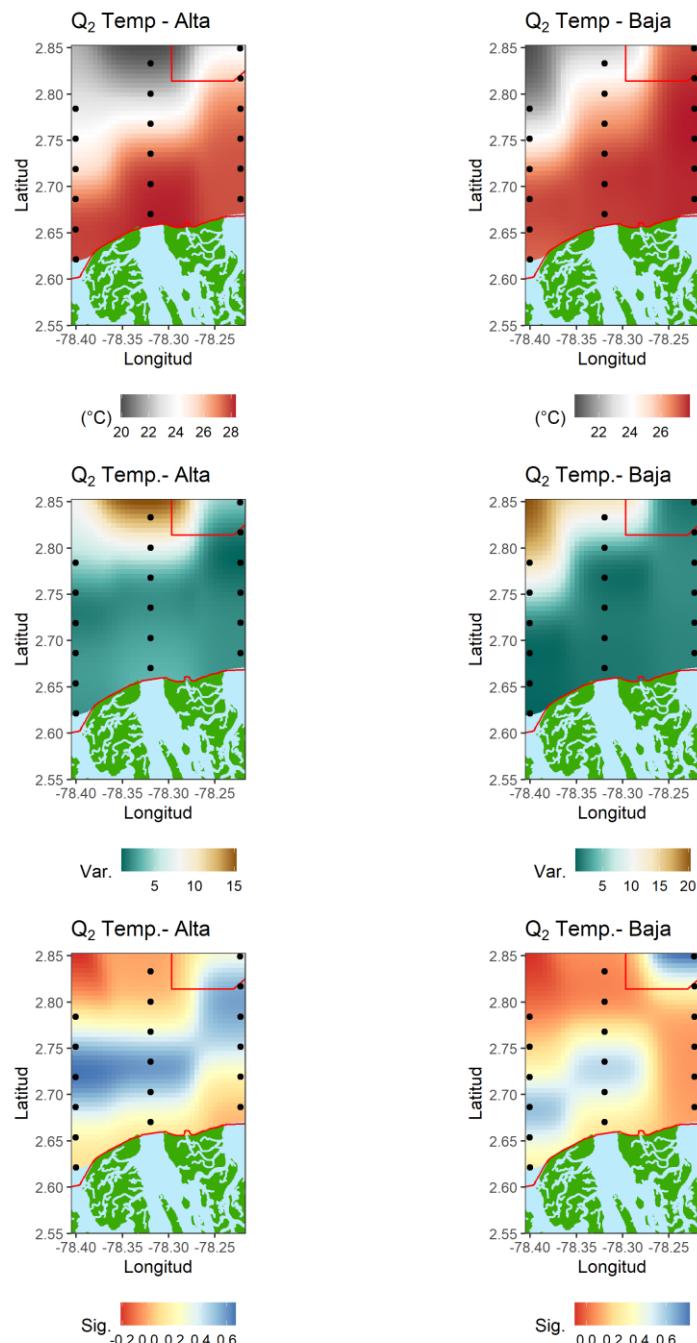


Figura 17. Distribución de la mediana de la temperatura en profundidad en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

La mediana de la salinidad presentó un máximo en marea alta de 34.5 PSU y un mínimo de 25.18 PSU y para la marea alta los valores de la salinidad estuvieron entre los 15.87 PSU y los 34.4 PSU con una tendencia a la disminución hacia el sector costero (Figura 15). En marea alta no se presentó una correlación espacial significativa ( $I$  de Moran = 0.03  $p$  = 0.21) pero en la marea baja la correlación fue positiva y muy significativa mostrando una fuente de variación significativa en la bocana de Guascama (Figura 18).

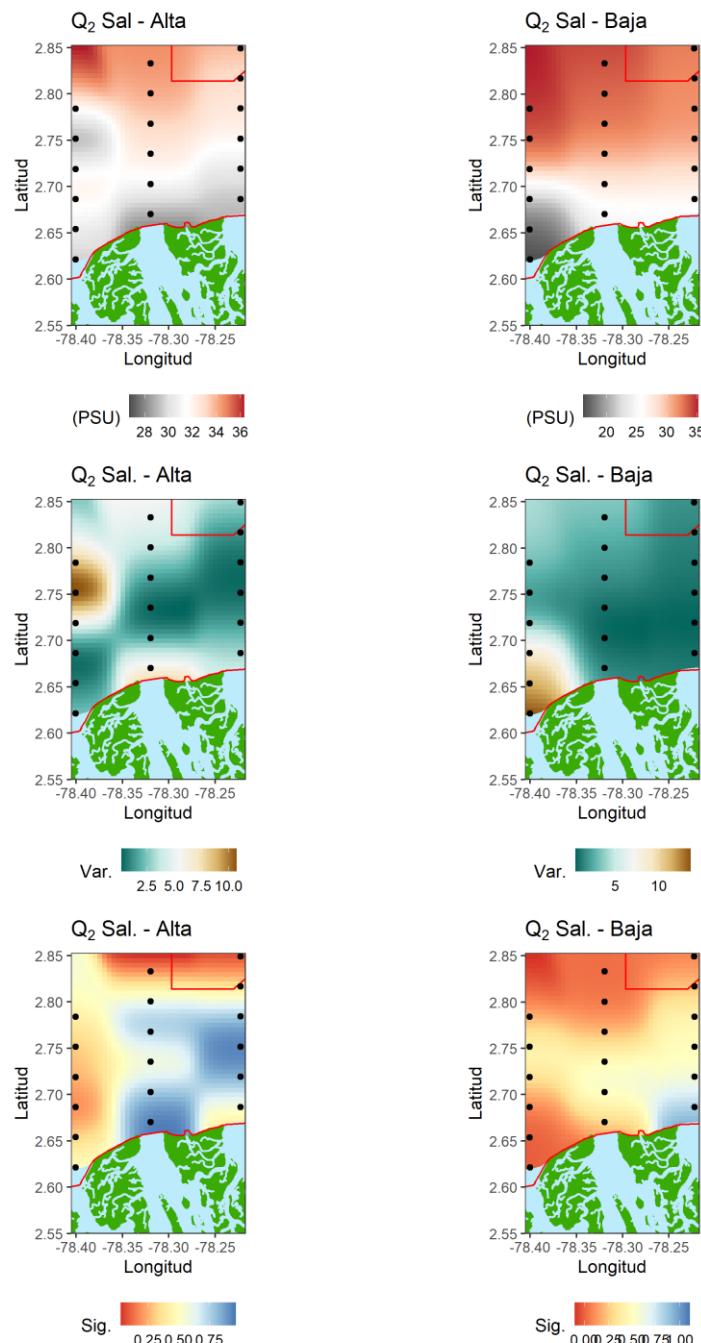


Figura 18. Distribución de la mediana de la salinidad en profundidad en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

La mediana del oxígeno en profundidad presentó un valor máximo de 5.45 mg O<sub>2</sub>. L<sup>-1</sup> y un mínimo de 3.8 mg O<sub>2</sub>. L<sup>-1</sup> para la marea alta. Para la marea baja los valores se presentaron entre 4.2 y 5.3 mg O<sub>2</sub>. L<sup>-1</sup>. La mayor concentración se presentó en marea alta en la bocana Sanquianga seguida de la bocana Guascama en el sector oceánico (Figura 18). En marea alta no se presentó una correlación espacial significativa ( $I$  de Moran = 0.12  $p$  = 0.06) y en marea baja la correlación fue positiva y significativa ( $I$  de Moran = 0.47  $p$  <0.05) presentándose una fuente de oxigenación en la columna de agua hacia el sector oceánico de la bocana Amarales (Figura 19).

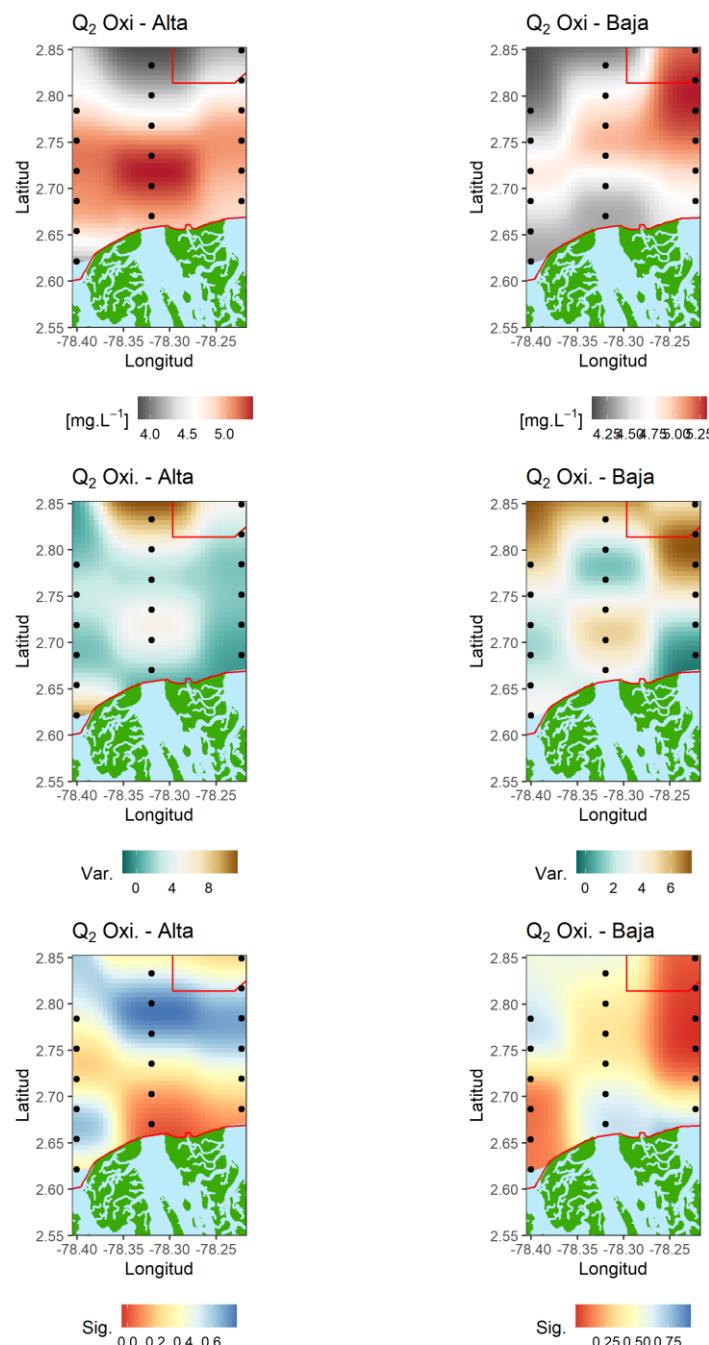


Figura 19. Distribución de la mediana del oxígeno disuelto en la columna de agua en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

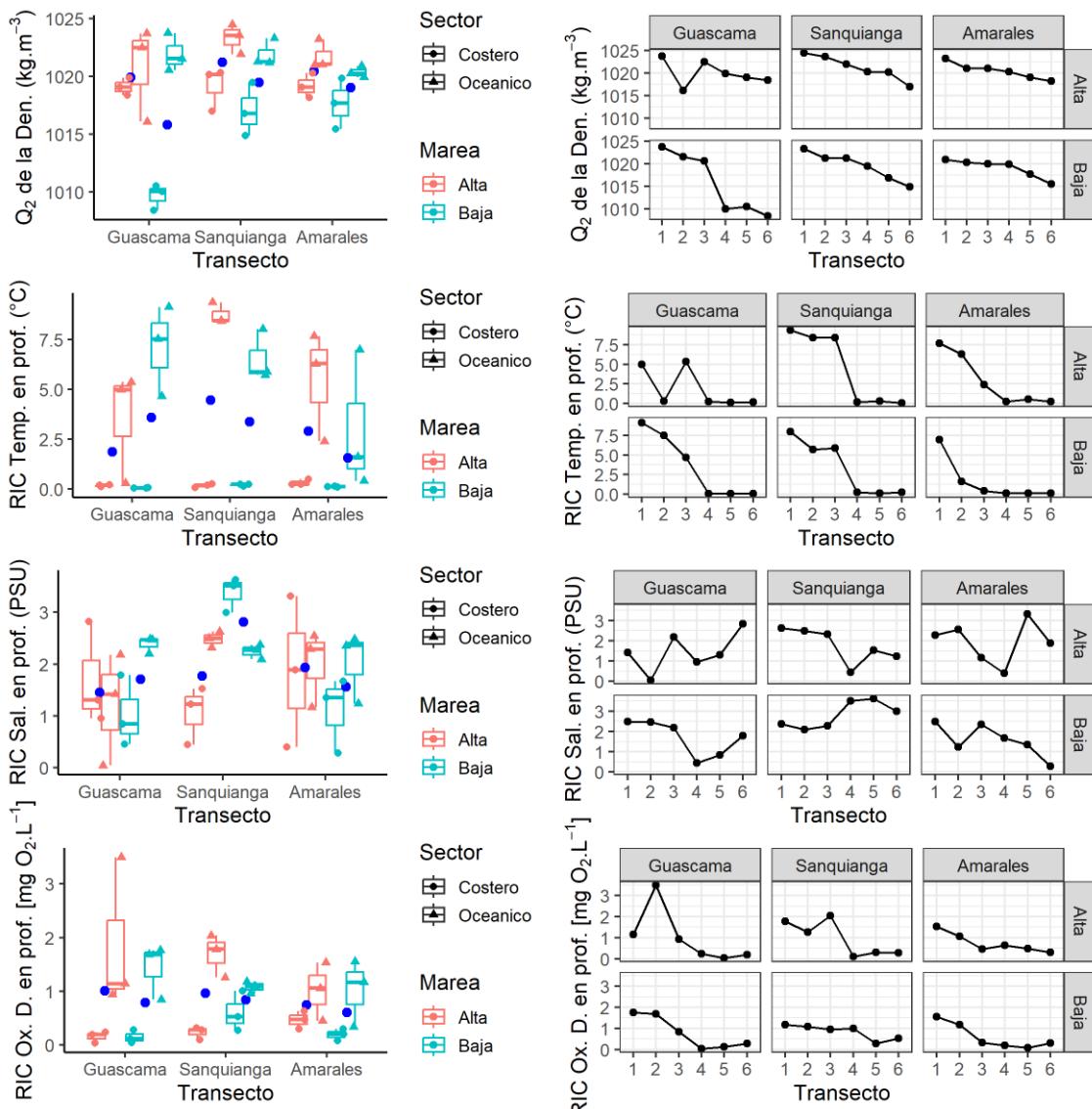


Figura 20. Diagrama de cajas y líneas mostrando la distribución de la mediana de la densidad en la profundidad de la columna de agua, el rango intercuartílico de la temperatura medida en profundidad de la columna de agua, el rango intercuartílico de la salinidad medida en profundidad de la columna de agua y el rango intercuartílico del oxígeno disuelto medido en profundidad de la columna de agua entre los períodos mareales, los sectores y los transectos de las bocanas de delta del río Sanquianga.

La mediana de la densidad medida en la profundidad de la columna de agua en la marea alta presentó un mínimo de  $1.016 \text{ kg.m}^{-3}$  y un máximo de  $1.024 \text{ kg.m}^{-3}$ , para la marea baja el valor mínimo de la mediana fue de  $1.008 \text{ kg.m}^{-3}$  y un máximo de  $1.024 \text{ kg.m}^{-3}$ . La tendencia general de la mediana en la columna de agua fue la disminuir hacia el sector costero (Figura 20). Para ambos períodos mareales se presentó una correlación espacial significativa (Marea Alta I de Moran=  $0.21$  p <0.01; Marea Baja I de Moran =  $0.47$  p <0.01), con unas fuentes de variación en el sector oceánico en la marea alta y una fuente de variación en la boca de Guascama en la marea baja (Figura 21).

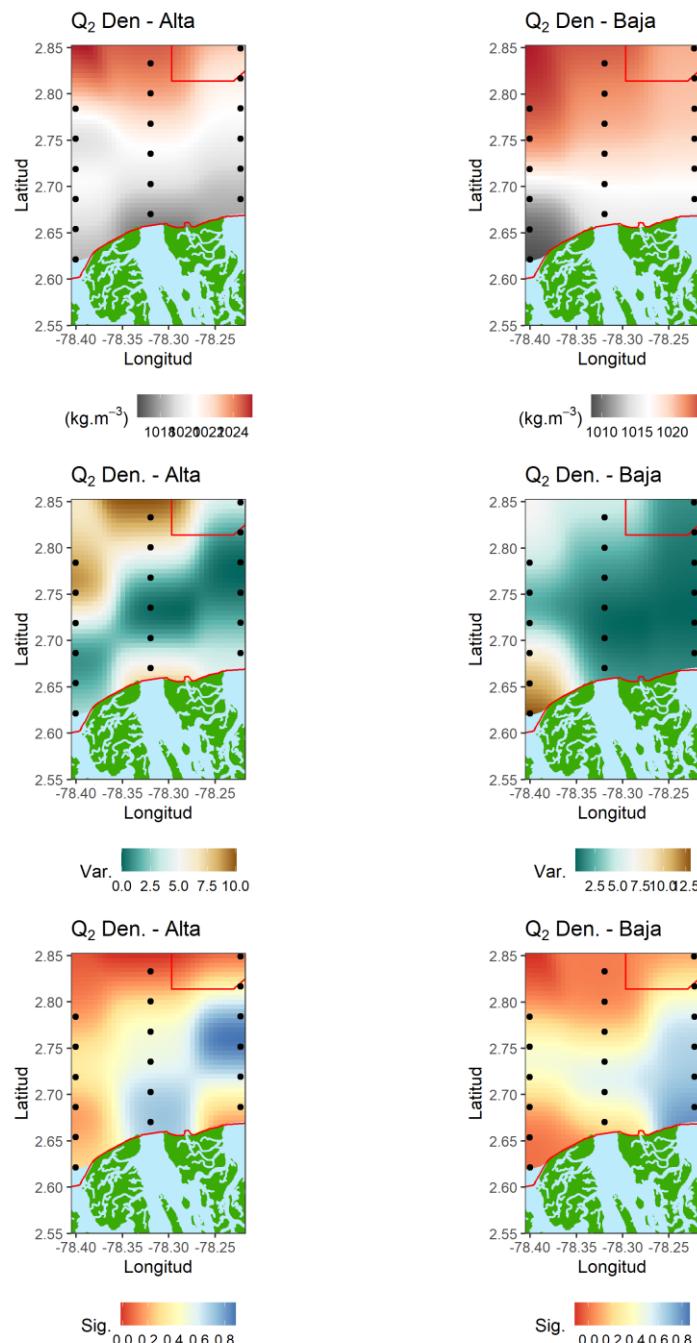


Figura 21. Distribución de la mediana de la densidad en la columna de agua en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

El rango intercuartílico de la temperatura medida en la profundidad de la columna de agua presentó el mayor valor en el sector oceánico de la bocana de Sanquianga durante la marea alta (9.3 °C), seguido de la bocana Guascama en marea baja (Figura 20). Para ambas mareas el rango intercuartílico de la temperatura presentó una correlación espacial positiva y significativa (Marea Alta I de Moran= 0.33 p <0.01; Marea Baja I de Moran = 0.45 p <0.01), con una fuente de variación muy marcada hacia los sectores oceánicos de todos los transectos (Figura 22).

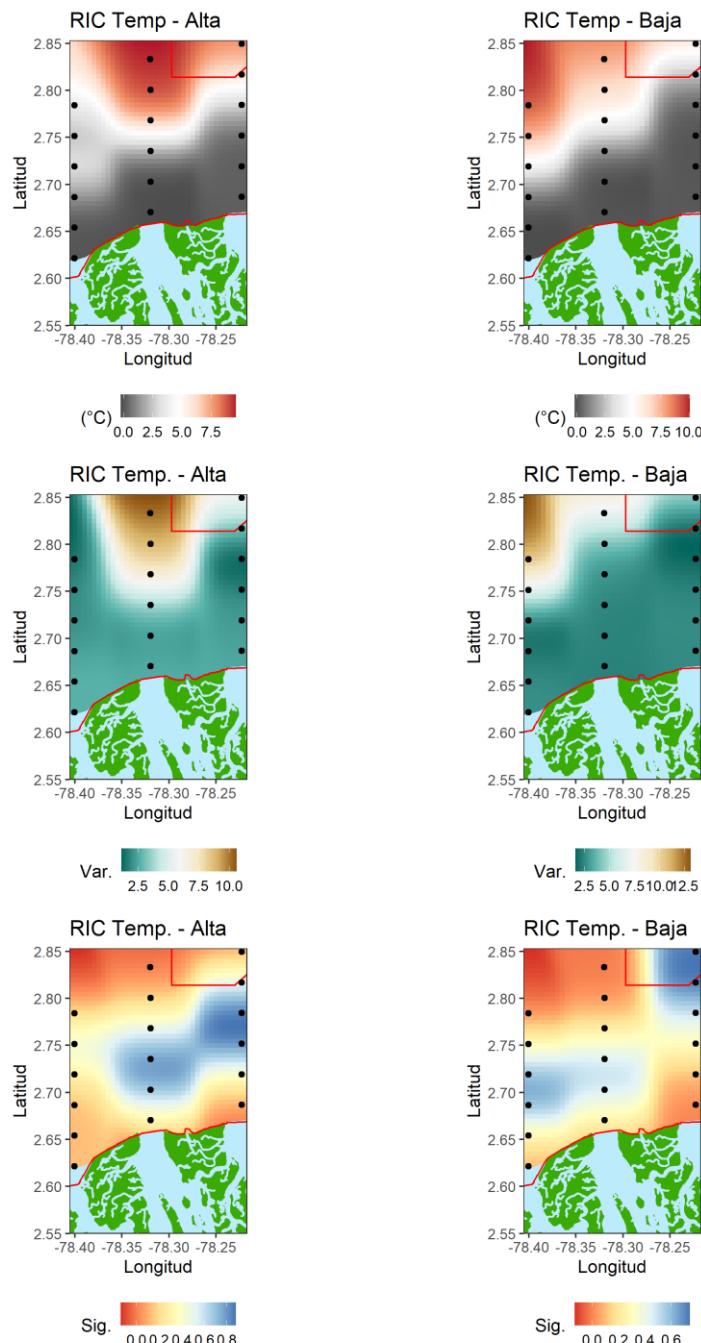


Figura 22. Distribución del rango intercuartílico de la temperatura medida en profundidad en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

El rango intercuartílico medido en la profundidad para la salinidad no presentó una tendencia clara entre las estaciones (Figura 20) y el mayo rango fue de 3.3 PSU en marea alta y de 3.6 PSU en marea baja. Tampoco se presentó una correlación espacial en el rango intercuartílico de la salinidad en la columna de agua para ninguno de los dos períodos mareales (Marea Alta I de Moran= -0.09 p =0.60; Marea Baja I de Moran = 0.08 p = 0.11), mostrando una variación aleatoria en toda la zona (Figura 23).

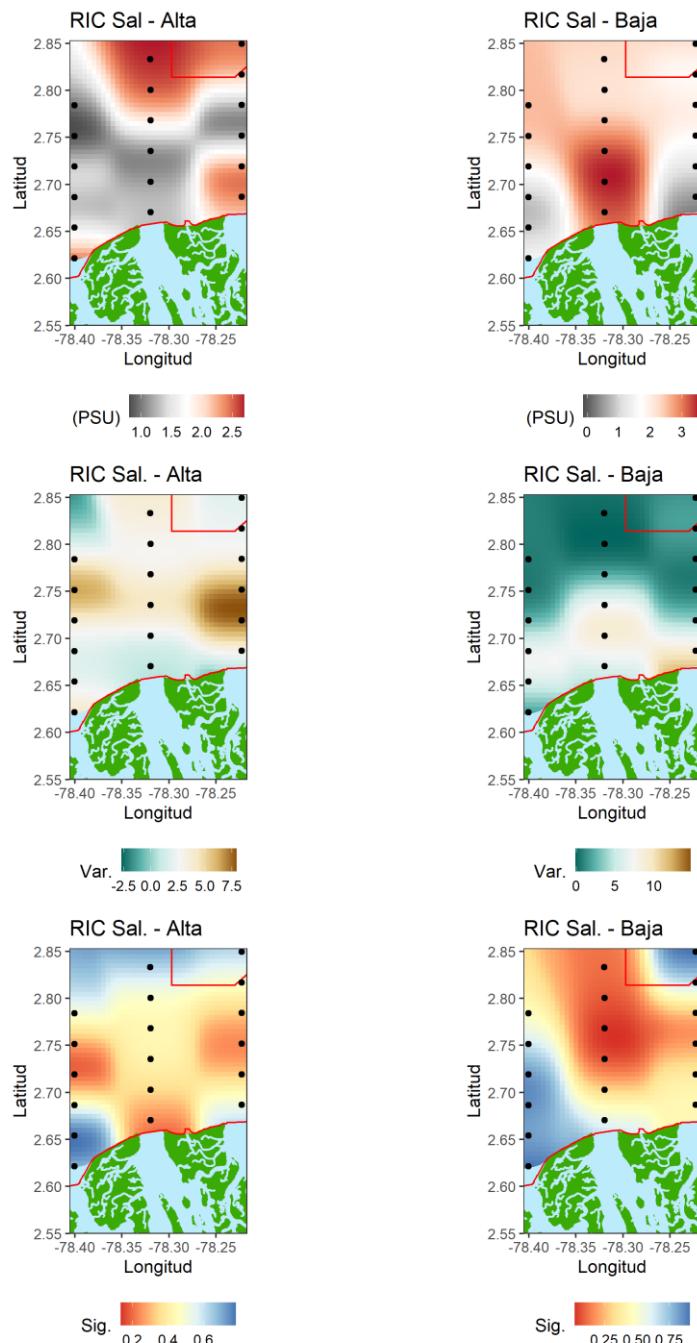


Figura 23. Distribución del rango intercuartílico de la salinidad en la columna de agua en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

El rango intercuartílico para el oxígeno disuelto presentó un valor máximo de  $3.4 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ , para la marea alta y un valor máximo de  $1.76 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  para la marea baja (Figura 20). Para ambos períodos mareales se presentó una correlación espacial muy significativa (Marea Alta I de Moran=  $0.20 p < 0.01$ ; Marea Baja I de Moran =  $0.35 p < 0.01$ ), presentando una fuente de variación hacia el sector oceánico del transecto de la bocana Guascama (Figura 24).

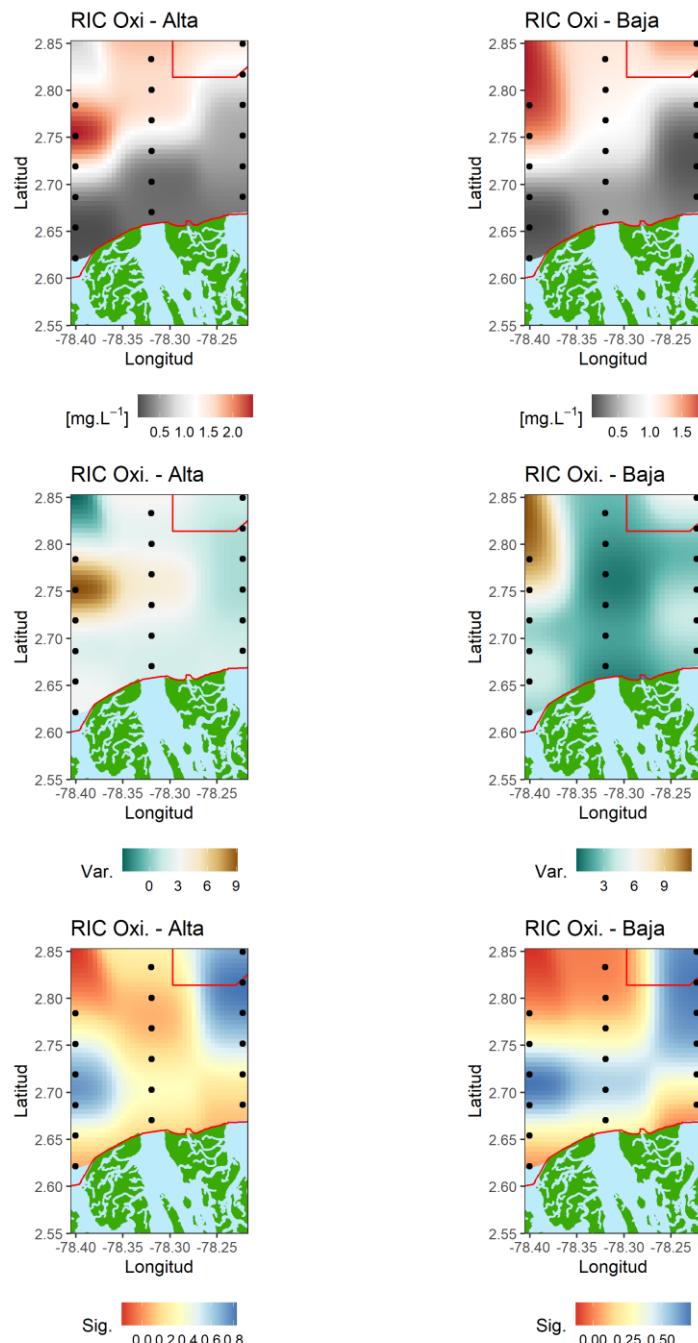


Figura 24. Distribución del rango intercuartílico del oxígeno disuelto medido en la columna de agua en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

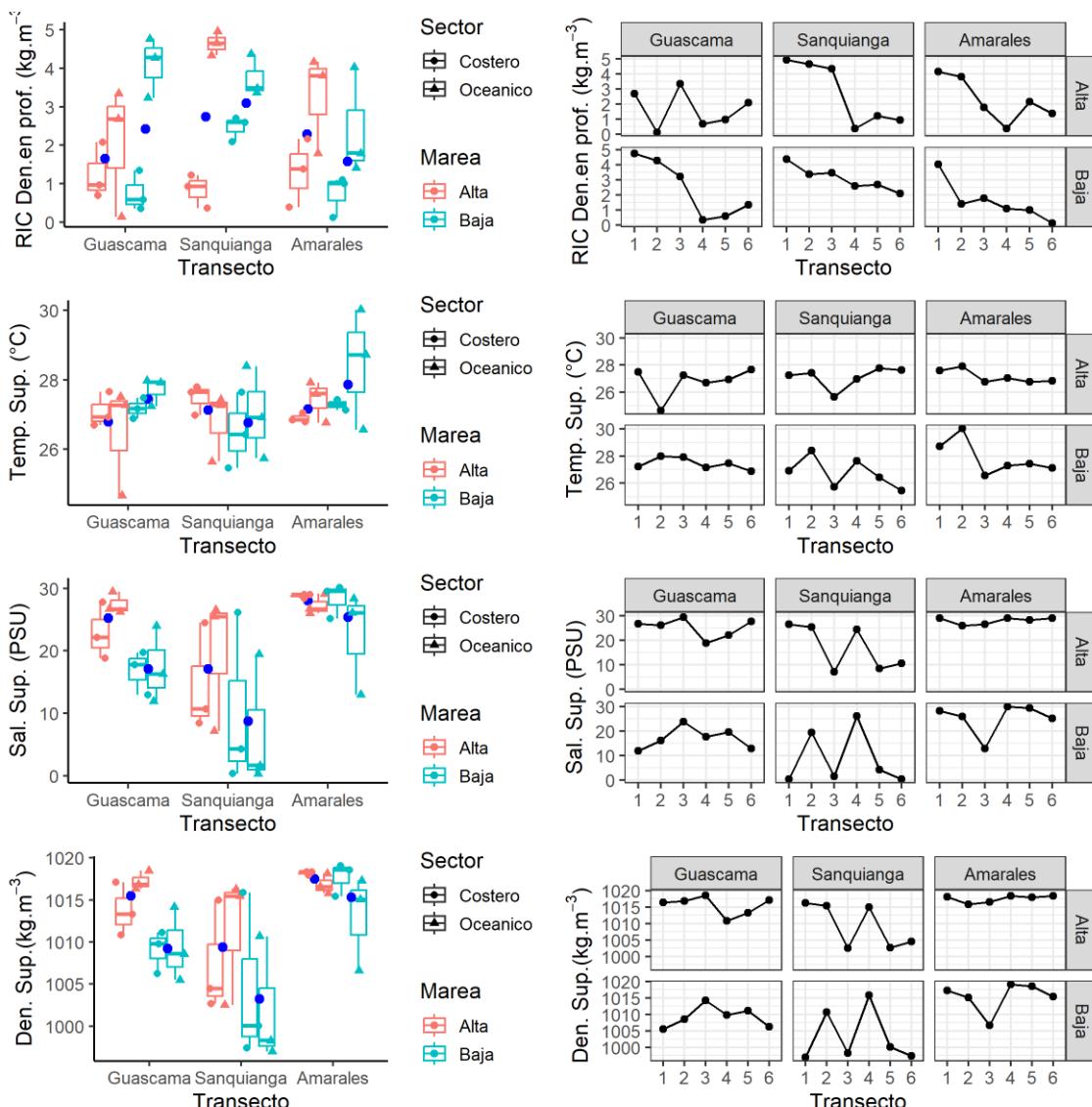


Figura 25. Diagrama de cajas y líneas mostrando la distribución del rango intercuartílico de la densidad medida en la columna de agua, la temperatura superficial de mar, la salinidad y la densidad superficiales, entre los períodos mareales, los sectores y los transectos de las bocanas de delta del río Sanquianga.

Existe una tendencia del rango intercuartílico de la densidad a disminuir hacia el sector costero y esta tendencia es más marcada en la marea baja (Figura 25). El valor máximo de este rango fue de  $0.005 \text{ kg.m}^{-3}$  para ambas mareas (Marea Alta I de Moran=  $0.19$  p <0.01; Marea Baja I de Moran =  $0.042$  p <0.01), presentando una correlación espacial muy significativa también en ambos períodos mareales (Figura 26).

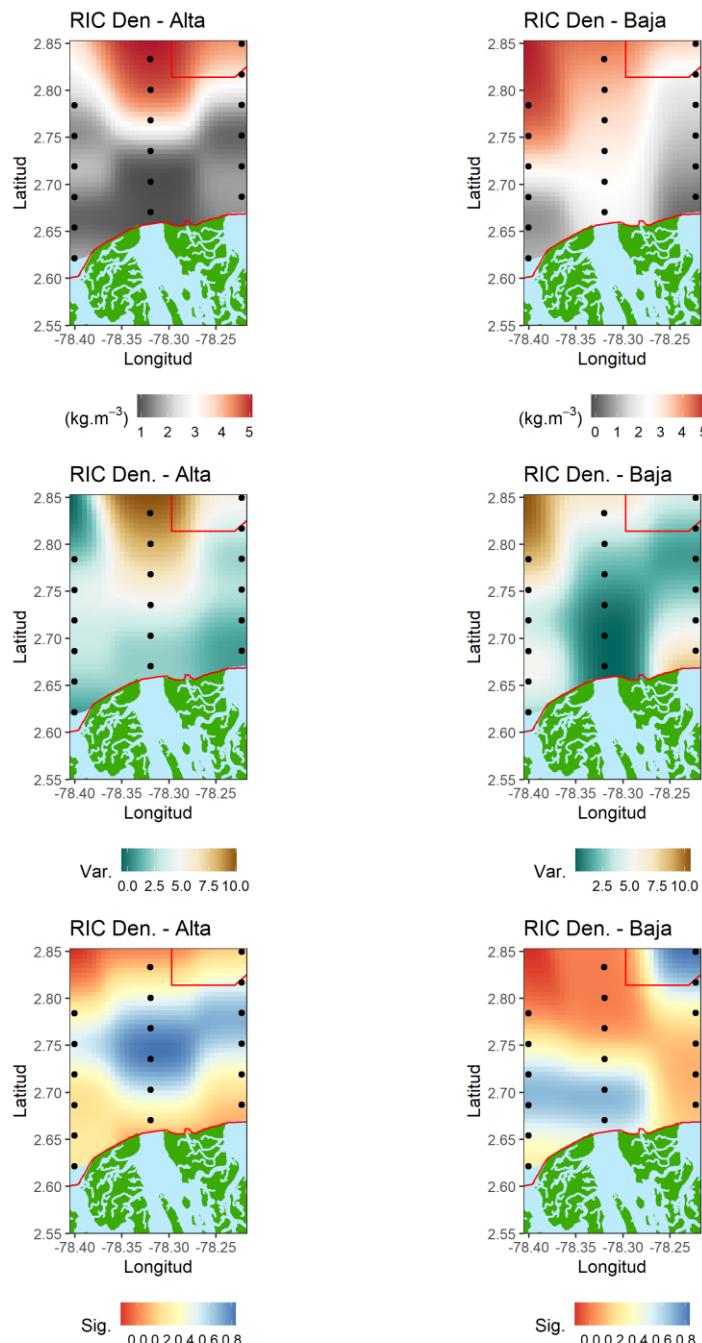


Figura 26. Distribución del rango intercuartílico de la densidad medido en la columna de agua en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

Durante el período de marea baja en el sector oceánico del transecto Amarales, se registró una temperatura superficial máxima de 30.02 °C y una temperatura superficial mínima de 24.6 °C, sin embargo, no se observó una clara tendencia en los valores de la temperatura superficial (Figura 25). No se presentaron correlaciones significativas para la temperatura superficial del agua en ninguno de los dos períodos mareales (Marea Alta I de Moran= 0.04 p = 0.17; Marea Baja I de Moran = 0.04 p = 0.16) (Figura 27).

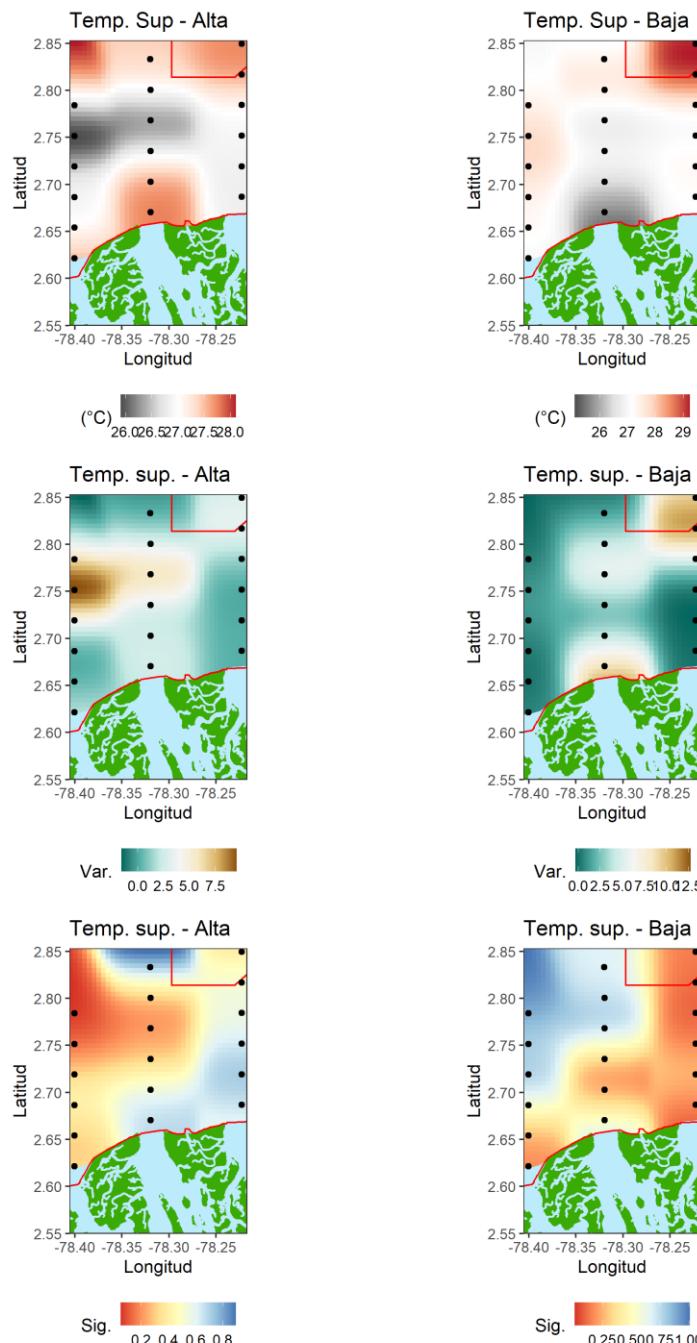


Figura 27. Distribución de la temperatura superficial del agua en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

Para la salinidad superficial no se encontró un patrón claro de distribución en la marea baja (Figura 25), sin embargo, para la marea alta, la tendencia fue a disminuir desde el sector oceánico al sector costero sobre todo en la bocana Sanquianga (Figura 25). La distribución de la salinidad presentó una autocorrelación espacial global para la marea alta pero no para la marea baja (Marea Alta I de Moran= 0.16 p <0.01; Marea Baja I de Moran = 0.1 p =0.09), encontrándose una fuente de variación muy significativa en la bocana del Sanquianga (Figura 28).

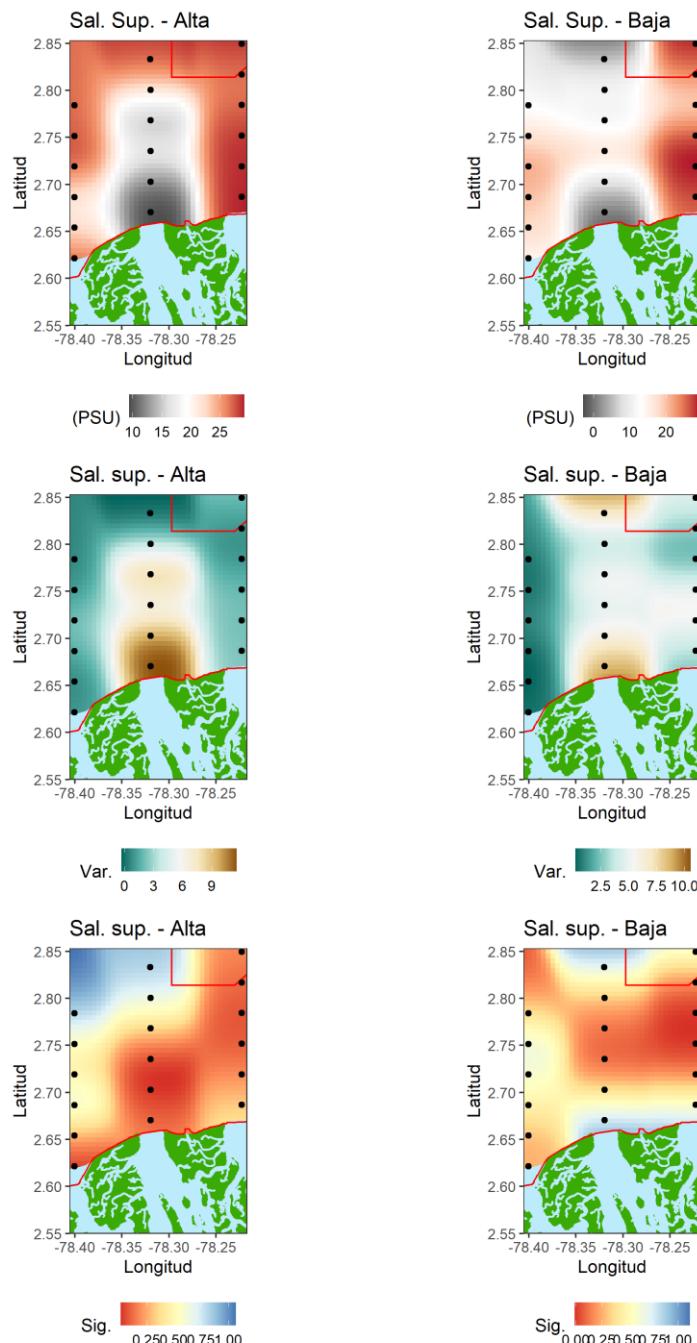


Figura 28. Distribución de la salinidad superficial en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

La densidad superficial está muy relacionada con la salinidad superficial y los patrones para ambas variables prácticamente son los mismos (ver Figura 28 y Figura 29). Ambas variables presentaron una correlación espacial solamente en la marea alta pero no en marea baja (Marea Alta I de Moran= 0.16 p <0.01; Marea Baja I de Moran = 0.1 p =0.08).

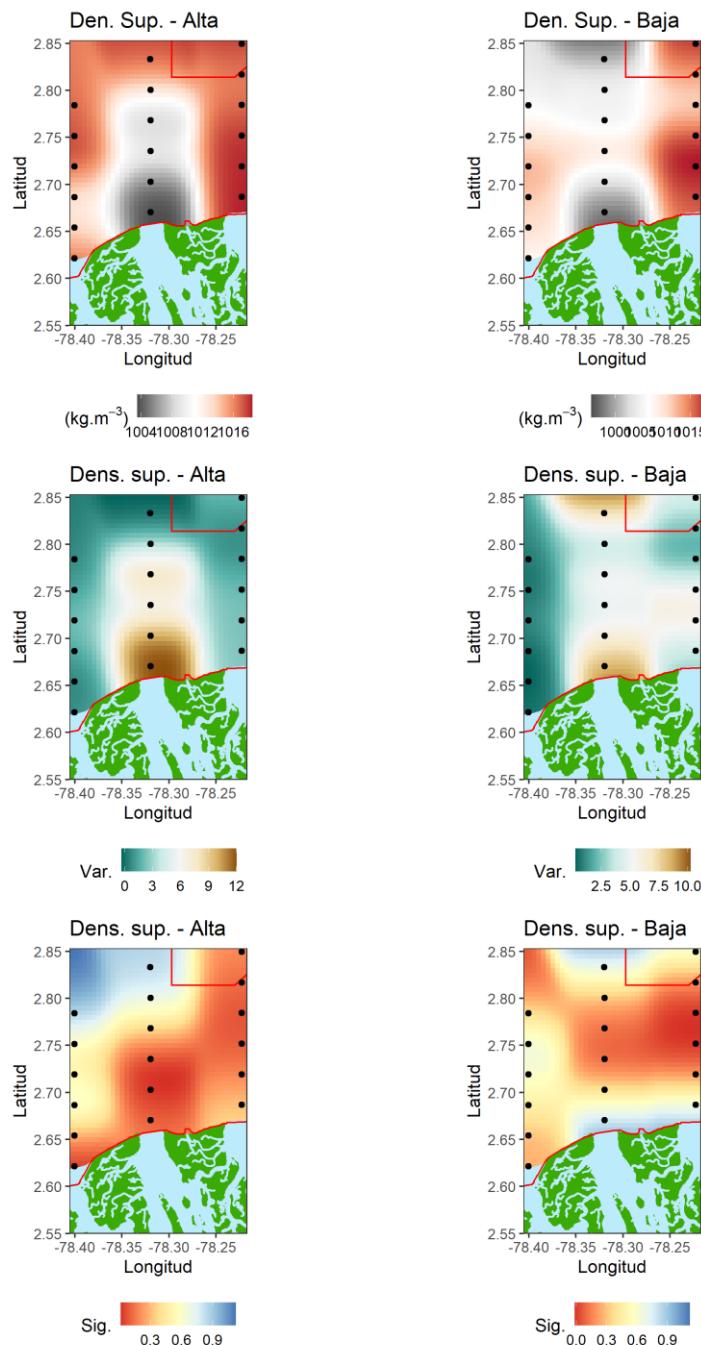


Figura 29. Distribución de la densidad superficial en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

En resumen, 65% (13) de las 20 variables consideradas presentaron correlación espacial positiva y significativa en la marea alta (Tabla 1) y el 80% (16) de las variables en marea baja (Tabla 1). Se realizaron análisis de comparaciones no paramétricos para evaluar las diferencias de las variables entre los transectos, los sectores y las mareas, sin embargo y debido a que se encontró una indicencia alta de autocorrelación espacial en estas variables, el supuesto de independencia entre muestras no se cumple, por lo tanto no se puede confiar en los resultados de estas pruebas. Solo se exponen aquí como referencias pero no se pueden extraer conclusiones a partir de estas pruebas porque la distribución de la mayoría de variables la explica la autocorrelación espacial. Solo las pruebas usadas para la Temperatura en superficie y el rango intercuartílico son validas en este caso.



Tabla 1. Resultados de las pruebas de comparación de las variables entre transectos, sectores y mareas.

Variable	Kruskal-Wallis			Wilcoxon				Autocorrelación Espacial			
	Transectos			Sectores		Mareas		Marea Alta		Marea Baja	
	X2	gl	P	w	P	w	P	I de Moran	P	I de Moran	P
Nitritos	25.70	26	0.49	239.00	< 0.05	67.00	< 0.01	0.33	< 0.01	0.35	< 0.01
Nitratos	28.19	30	0.56	232.00	< 0.05	96.00	< 0.05	-0.05	0.49	0.55	< 0.01
Fosfatos	14.99	22.00	0.86	280.00	< 0.01	111.00	0.10	0.09	0.09	0.30	< 0.01
Silicatos	35.00	35.00	0.46	223.00	< 0.06	55.00	< 0.01	-0.05	0.47	0.53	< 0.05
pH	23.82	21.00	0.30	32.00	< 0.01	207.00	0.10	0.34	< 0.01	0.55	< 0.01
Oxígeno Disuelto en Sup.	26.20	32.00	0.70	34.00	< 0.01	252.00	< 0.01	0.32	< 0.01	0.38	< 0.01
Transparencia	24.50	19.00	0.17	50.50	< 0.01	233.00	< 0.05	0.29	< 0.01	0.27	< 0.01
Solidos Suspendidos Totales	35.00	35.00	0.46	274.00	< 0.01	110.00	0.10	0.07	< 0.05	0.28	< 0.01
TSI_Secchi	24.00	19.00	0.17	273.00	< 0.01	90.00	< 0.05	0.29	< 0.01	0.41	< 0.01
Q2 Temperatura en prof.	35.00	35.00	0.46	300.00	< 0.01	162.00	1.00	0.44	< 0.01	0.34	< 0.01
Q2 Salinidad en prof.	35.00	35.00	0.46	20.00	< 0.01	206.00	0.17	0.03	0.21	0.46	< 0.01
Q2 Oxígeno en prof.	35.00	35.00	0.46	185.00	0.40	117.00	0.60	0.12	0.06	0.19	< 0.05
Q2 Densidad en prof.	35.00	35.00	0.46	169.00	0.83	206.00	0.17	0.21	< 0.05	0.47	< 0.05
RIC Temperatura en prof.	35.00	35.00	0.46	2.00	< 0.01	190.00	0.38	0.33	< 0.01	0.45	< 0.01
RIC Salinidad en prof.	35.00	35.00	0.46	20.00	< 0.01	136.00	0.42	-0.09	0.60	0.08	0.11
RIC Oxígeno en prof.	35.00	35.00	0.46	11.00	< 0.01	172.00	0.76	0.20	< 0.01	0.35	< 0.01
RIC Densidad en prof.	35.00	35.00	0.46	33.00	< 0.01	152.00	0.76	0.19	< 0.05	0.42	< 0.01
Temperatura en sup.	35.00	35.00	0.46	129.00	0.30	139.00	0.48	0.04	0.17	0.04	0.16
Salinidad en sup.	35.00	35.00	0.46	120.00	0.19	224.00	< 0.05	0.16	< 0.05	0.10	0.09
Densidad en sup.	35.00	35.00	0.46	169.00	0.83	228.00	< 0.05	0.17	< 0.05	0.10	0.08

\*solo estos análisis son válidos debido a que no se detectaron autocorrelación espacial en estas variables en ninguno de los períodos mareales , cumpliéndose así el supuesto de independencia de las muestras.



Para disminuir la complejidad del análisis de las variables fisicoquímicas se realizó un análisis de componentes principales, sin embargo, debido al escenario de una alta autocorrelación espacial estos resultados hay que considerarlos NO concluyentes completamente ya que este escenario viola los supuestos de independencia entre las muestras, presentándose pseudoreplicación.

Para la primera dimensión se observa que ocho variables tienen correlaciones fuertes cuatro positivas muy relacionadas con los nutrientes sólidos suspendidos y la calidad del agua (TSI) y cuatro negativas relacionadas con el pH, densidad, transparencia y oxígeno disuelto. En la segunda dimensión las correlaciones fuertes positivas se presentaron con las variables de la mediana de oxígeno medida en la columna de agua, la salinidad superficial y la densidad superficial. Las correlaciones negativas se presentaron para el rango intercuartílico de la salinidad, la temperatura y la densidad (Figura 30).

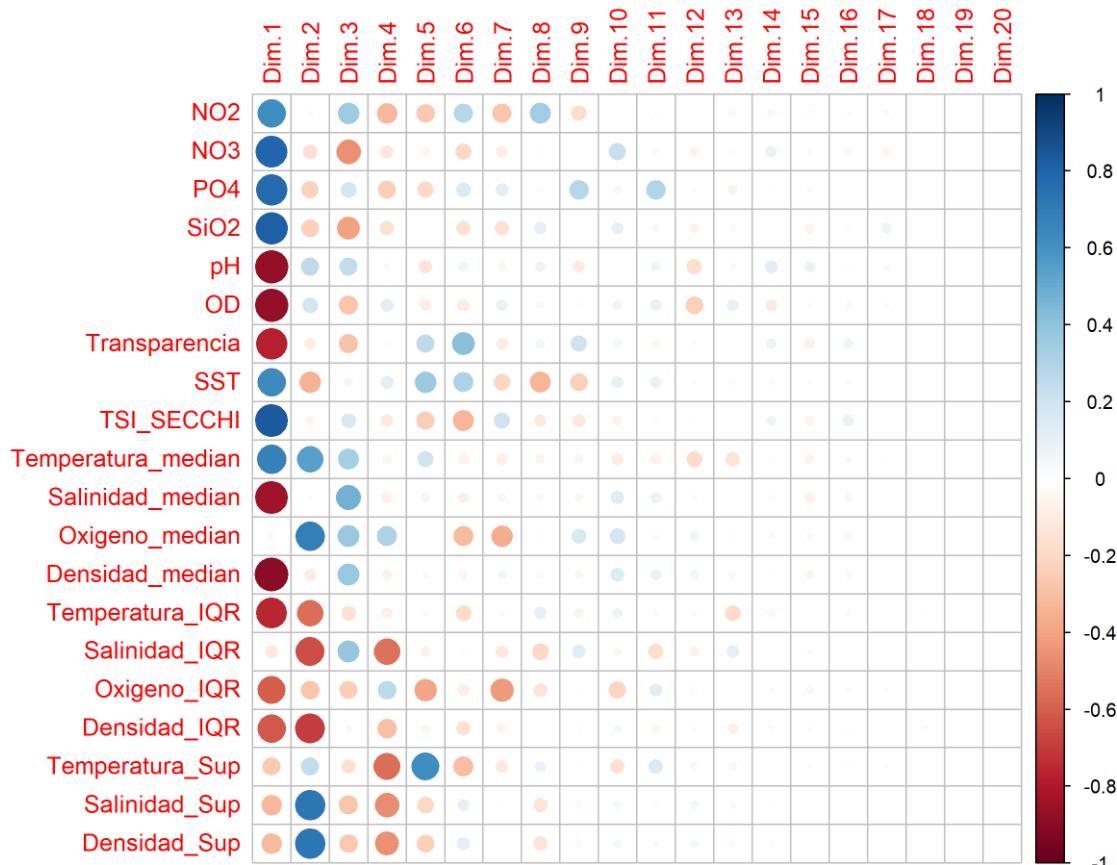


Figura 30. Correlación múltiple de las variables analizadas por dimensiones del análisis del componente principales.

En este análisis arrojó que el primer componente aportó un 45.3% aproximadamente a la variación total del conjunto de variables y las variables que más aportaron a este componente fueron la mediana del oxígeno disuelto, el pH, el oxígeno disuelto en la superficie y la mediana de la salinidad medida en la columna de agua. El segundo componente aportó aproximadamente el 17% de la variación total del conjunto de variables y las variables que más aportaron a este componente fueron la densidad superficial la salinidad superficial y el rango intercuartílico de la densidad medido en la columna del agua. Para el tercer componente las variables que mas aportaron fueron la mediana de la salinidad medida en la profundidad, los nitratos y los silicatos, con un aporte del 9% a la explicación de la variabilidad total. Estos tres componentes explican alrededor de un 70 % de la variabilidad total de las variables obtenidas en el estudio.

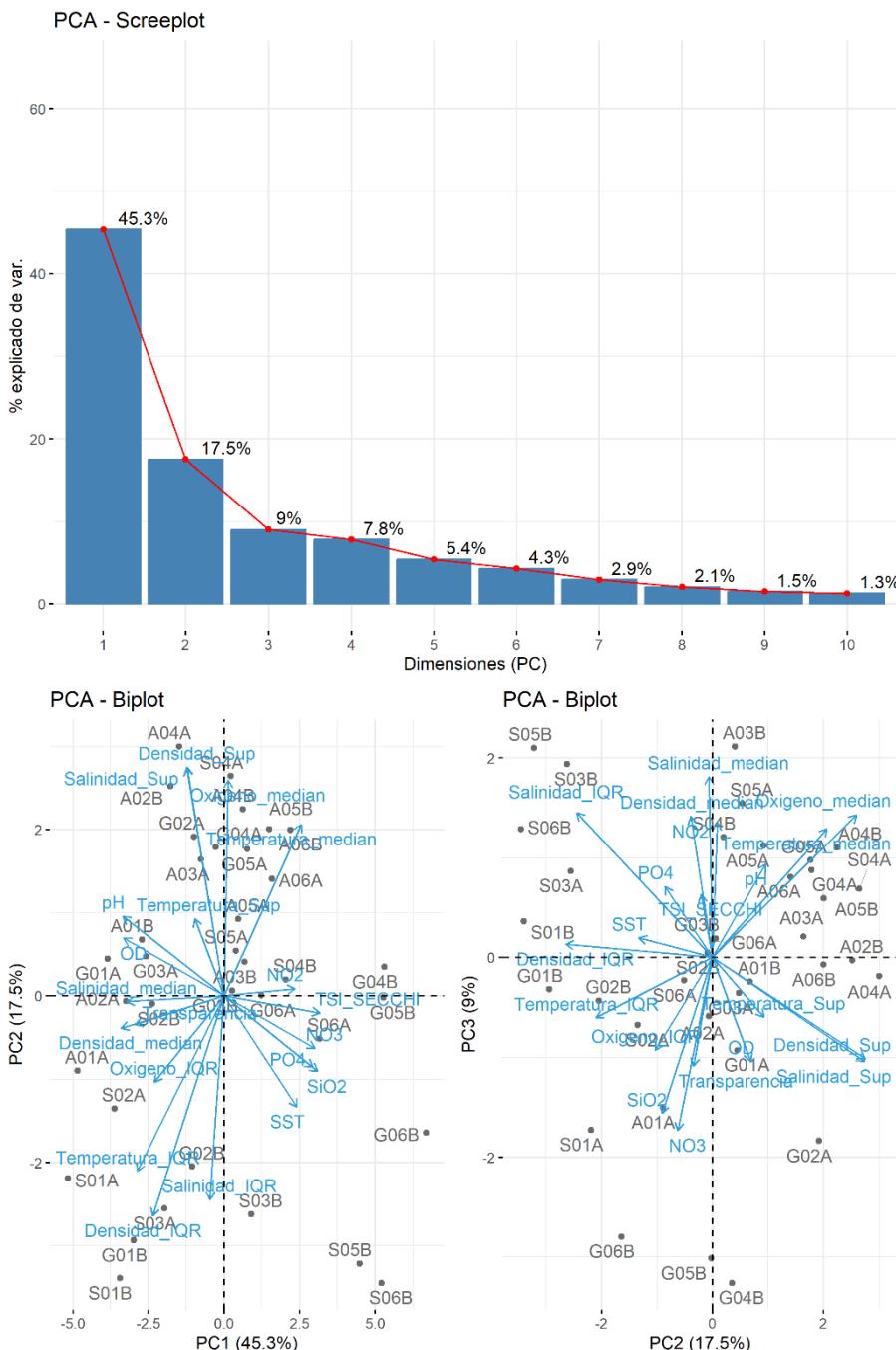


Figura 31. Gráfico de sedimentación (Screeplot) y gráfico de coordenadas paralelas de los componentes principales para las 20 variables físico químicas obtenidas en este estudio.

Al examinar las agrupaciones por las diferentes categorías consideradas para el área de estudio, no se encontraron agrupamientos ni por marea, ni por transecto ni por sector (Figura 32).

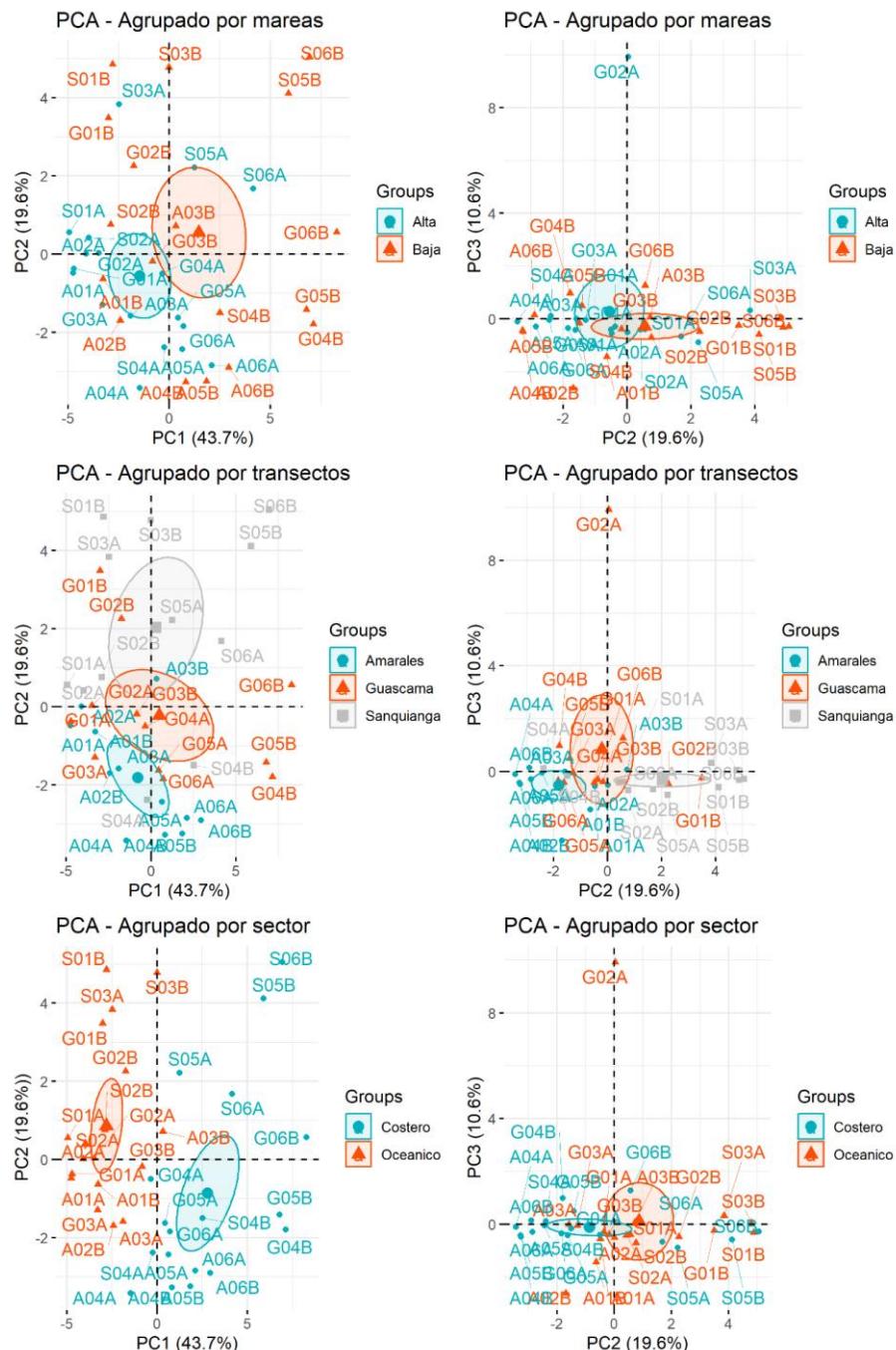


Figura 32. Gráfico de coordenadas paralelas de los componentes principales, discriminando las diferentes categorías de períodos mareales, transectos y sectores.



## 6.2 Análisis biológico

### Fitoplancton

Se identificaron un total de 150 especies y UTO, de las cuales 95 pertenecen a la clase *Bacillarophyceae* y 55 a la clase *Dinophyceae*. Los órdenes más representativos de la clase *Bacillarophyceae* fueron *Chaetocerotanae*, con 21 especies, y *Coscinodiscales*, con 14 especies. Por su parte, la clase *Dinophyceae* estuvo mayormente representada por los órdenes *Gonyaulacales* (23 especies), *Dinophysiales* (7 especies) y *Peridiniales* (7 especies) (Tabla 2).

Tabla 2. Listado de especies del fitoplancton de la desembocadura del delta Sanquianga. (+) Presencia en cada transecto.

Taxón	Transecto		
	Amarales	Guascama	Sanquianga
<b>Bacillariophyceae</b>			
<b>Asterolamprales</b>			
<i>Asteromphalus</i>	+		+
<i>Asteromphalus flabellatus</i>		+	+
<b>Bacillariales</b>			
<i>Bacillaria paxillifera</i>	+	+	+
<i>Nitzschia sp</i>	+		+
<i>Nitzschia closterium</i>			+
<i>Nitzschia sigmaformis</i>	+	+	+
<i>Nitzschia sigmoidea</i>		+	+
<i>Pseudonitzschia</i>	+	+	
<b>Chaetocerotanae</b>			
<i>Bacteriastrum delicatulum</i>	+	+	+
<i>Bacteriastrum furcatum</i>		+	
<i>Bacteriastrum hyalinum</i>		+	+
<i>Chaetoceros sp</i>	+	+	+
<i>Chaetoceros affinis</i>	+		+
<i>Chaetoceros brevis</i>	+	+	+
<i>Chaetoceros coarctatus</i>		+	
<i>Chaetoceros compressus</i>	+	+	+
<i>Chaetoceros curvisetus</i>		+	+
<i>Chaetoceros danicus</i>	+	+	+
<i>Chaetoceros debilis</i>	+	+	+
<i>Chaetoceros denticulatus</i>		+	
<i>Chaetoceros diversus</i>	+	+	+
<i>Chaetoceros lacinosus</i>	+	+	+
<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	+		+
<i>Chaetoceros paradoxus</i>	+		
<i>Chaetoceros peruvianus</i>	+	+	+
<i>Chaetoceros protuberans</i>		+	+
<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>	+	+	
<i>Chaetoceros radicans</i>		+	+



Taxón	Transecto		
	Amarales	Guascama	Sanquianga
<i>Chaetoceros subtilis</i>	+	+	+
<i>Coscinodiscales</i>			
<i>Actinocyclus sp</i>	+	+	
<i>Actinoptychus senarius</i>	+	+	+
<i>Aulacodiscus archangelskianus</i>		+	+
<i>Aulacodiscus kittonii</i>	+	+	
<i>Coscinodiscopsis sp</i>	+	+	+
<i>Coscinodiscopsis jonesiana</i>		+	+
<i>Coscinodiscus sp</i>	+	+	+
<i>Coscinodiscus aff asteromphalus</i>		+	
<i>Coscinodiscus centralis</i>		+	+
<i>Coscinodiscus gigas</i>	+		+
<i>Coscinodiscus granii</i>	+	+	
<i>Coscinodiscus marginatus</i>	+	+	
<i>Coscinodiscus perforatus</i>	+	+	
<i>Coscinodiscus radiatus</i>		+	+
<i>Coscinodiscus wailesii</i>	+	+	+
<i>Stellarima sp</i>	+	+	
<b>Fragilariales</b>			
<i>Synedra sp</i>	+	+	+
<b>Hemiaulales</b>			
<i>Cerataulina bicornis</i>	+	+	+
<i>Cerataulina dentata</i>	+	+	+
<i>Cerataulina pelagica</i>	+	+	+
<i>Climacodium frauendorfianum</i>	+	+	+
<i>Eucampia zodiacus</i>	+	+	+
<i>Hemiaulus membranaceus</i>	+		+
<i>Hemiaulus sinensis</i>	+	+	+
<i>Streptotheca tamesis</i>	+	+	+
<b>Leptocylindrales</b>			
<i>Leptocylindrus danicus</i>	+	+	+
<b>Lithodesmiales</b>			
<i>Ditylum brightwellii</i>	+	+	+
<i>Lithodesmium undulatum</i>	+	+	+
<b>Lyrellaales</b>			
<i>Lyrella sp</i>	+	+	+
<b>Melosirales</b>			
<i>Melosira sp</i>			+
<i>Stephanopyxis turris</i>	+	+	
<b>Naviculales</b>			
<i>Diploneis gruendleri</i>	+	+	+
<i>Gyrosigma sp</i>	+		+
<i>Meuniera membranacea</i>		+	+
<i>Navicula sp</i>		+	



Taxón	Transecto		
	Amarales	Guascama	Sanquinga
<i>Phaeodactylum</i> sp		+	
<i>Plagiotropis</i> sp	+	+	+
<b>Rhaponeidales</b>			
<i>Neodelphineis pelagica</i>	+	+	+
<b>Rhizosoleniales</b>			
<i>Guinardia delicatula</i>		+	+
<i>Guinardia flaccida</i>	+		+
<i>Guinardia striata</i>	+	+	+
<i>Neocalyprella robusta</i>		+	+
<i>Proboscia alata</i>	+	+	
<i>Pseudosolenia calcar-avis</i>	+	+	+
<i>Rhizosolenia bergenii</i>	+		+
<i>Rhizosolenia cf. habetata</i>	+	+	+
<i>Rhizosolenia imbricata</i>	+	+	
<i>Rhizosolenia setigera</i>	+	+	+
<b>Surirellales</b>			
<i>Entomoneis</i> sp	+	+	+
<i>Surirella</i> sp	+	+	+
<b>Thalassionematales</b>			
<i>Lioloma elongatum</i>		+	+
<i>Lioloma pacificum</i>	+	+	+
<i>Thalassionema</i> sp	+		+
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	+	+	+
<i>Thalassionema nitzschiooides</i>	+	+	+
<b>Thalassiosirales</b>			
<i>Cyclotella striata</i>	+	+	+
<i>Planktoniella muriformis</i>	+	+	+
<i>Skeletonema costatum</i>		+	
<i>Skeletonema pseudocostatum</i>	+	+	+
<i>Skeletonema tropicum</i>	+	+	+
<i>Thalassiosira</i> sp	+	+	+
<b>Triceratiales</b>			
<i>Hobaniella longicruris</i>	+	+	
<i>Odontella</i> sp	+	+	+
<i>Odontella aurita</i>		+	+
<i>Trieres chinensis</i>	+	+	+
<i>Trieres mobiliensis</i>	+	+	+
<b>Dinophyceae</b>			
<b>Dinophysiales</b>			
<i>Dinophysis caudata</i>	+	+	+
<i>Ornithocercus</i> sp		+	+
<i>Ornithocercus steinii</i>	+		+
<i>Ornithocercus thumii</i>		+	
<i>Phalacroma</i> sp	+	+	+



Taxón	Transecto		
	Amarales	Guascama	Sanquinga
<i>Phalacroma mitra</i>		+	
<i>Phalacroma rapa</i>	+	+	+
<b>Gonyaulacales</b>			
<i>Alexandrium sp</i>	+		+
<i>Ceratocoris horrida</i>	+		
<i>Gonyaulax sp</i>	+	+	+
<i>Gonyaulax polygramma</i>			+
<i>Pyrodinium bahamense</i>	+	+	+
<i>Pyrophacus sp</i>		+	+
<i>Tripos sp</i>	+	+	+
<i>Tripos arietinus</i>	+	+	+
<i>Tripos brevis</i>	+		+
<i>Tripos candelabrum</i>	+	+	+
<i>Tripos declinatum</i>			+
<i>Tripos eugrammus</i>	+	+	+
<i>Tripos extensus</i>	+	+	
<i>Tripos fusus</i>	+	+	+
<i>Tripos karstenii</i>	+		+
<i>Tripos lunula</i>	+	+	+
<i>Tripos macroceros</i>	+	+	
<i>Tripos massiliensis</i>	+		+
<i>Tripos muelleri</i>	+	+	+
<i>Tripos pentagonus</i>	+	+	+
<i>Tripos teres</i>	+	+	
<i>Tripos trichoceros</i>	+	+	+
<i>Tripos vultur</i>	+		+
<b>Gymnodiniales</b>			
<i>Gyrodinium spirale</i>	+	+	+
<b>Peridiniales</b>			
<i>Podolampas bipes</i>	+	+	+
<i>Protoperidinium sp 1</i>		+	+
<i>Protoperidinium sp2</i>	+	+	
<i>Protoperidinium sp3</i>	+	+	+
<i>Protoperidinium pyriforme</i>	+	+	+
<i>Protoperidinium pyrum</i>	+	+	+
<i>Scripsiella sp</i>	+	+	+
<b>Prorocentrales</b>			
<i>Prorocentrum sp</i>	+		+
<i>Prorocentrum compressum</i>	+	+	+
<i>Prorocentrum cordatum</i>		+	+
<i>Prorocentrum lima</i>	+		
<i>Prorocentrum mexicanum</i>	+	+	+
<i>Prorocentrum rhabdium</i>	+	+	+
<b>Pyrocystales</b>			



Taxón	Transecto	Amarales	Guascama	Sanquianga
<i>Pyrocistis sp</i>	+			

Combinando las diferentes medidas de biodiversidad ( ${}^0D$ ,  ${}^1D$  y  ${}^2D$ ) del fitoplancton, no se encontraron diferencias significativas entre los períodos mareales MRPP ( $A = -0.0043$ ,  $p = 0.25$ ) y entre los transectos ( $A = -0.0043$ ,  $p = 0.17$ ), pero si se encontró diferencias entre los sectores, aunque con una significancia un poco mayo de 0.05 ( $A = 0.03$ ,  $p = 0.07$ ) (Figura 33).

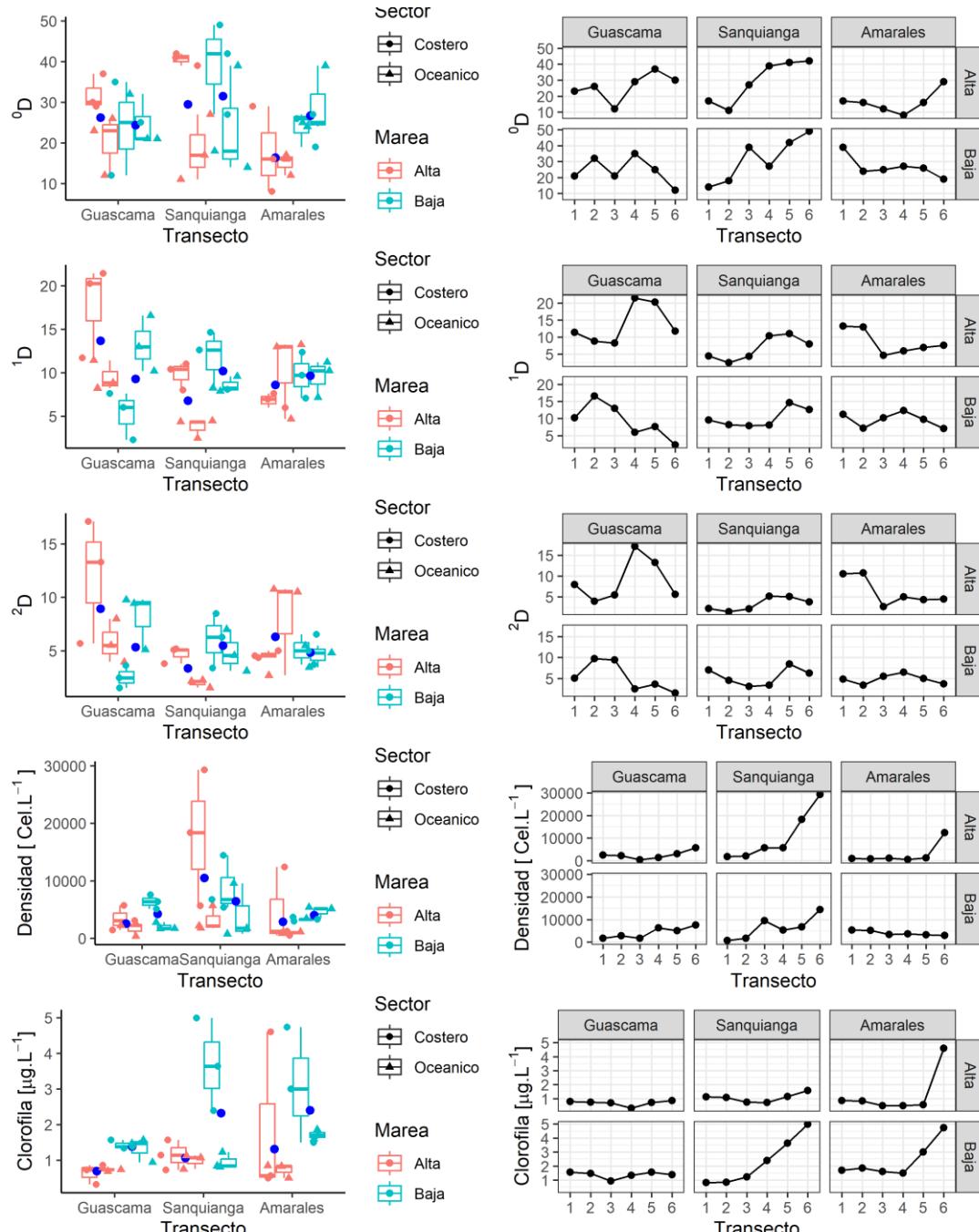


Figura 33. Diagrama de cajas y líneas mostrando la distribución de medidas de la biodiversidad  ${}^0D$ ,  ${}^1D$  y  ${}^2D$ , la densidad de células de fitoplancton y la concentración de clorofila a, entre los períodos mareales, los sectores y los transectos de las bocanas de delta del río Sanquianga.



El valor más alto de la diversidad de nivel  ${}^0D$  fue de 49 para la marea baja en el transecto de Sanquianga y el menor fue de 8 para la marea baja en el transecto de Sanquianga. Esta medida de diversidad presentó una correlación espacial positiva y altamente significativa en la marea alta ( $I$  de Moran= 0.33  $p <0.01$ ) pero para la marea baja no presentó ningún tipo de estructura espacial siendo su variación completamente azarosa ( $I$  de Moran = -0.0053  $p =0.5$ ) (Figura 34).

La mayor fuente de variación para la estructura espacial se presentó en la bocana Sanquianga alcanzando todo el sector costero.

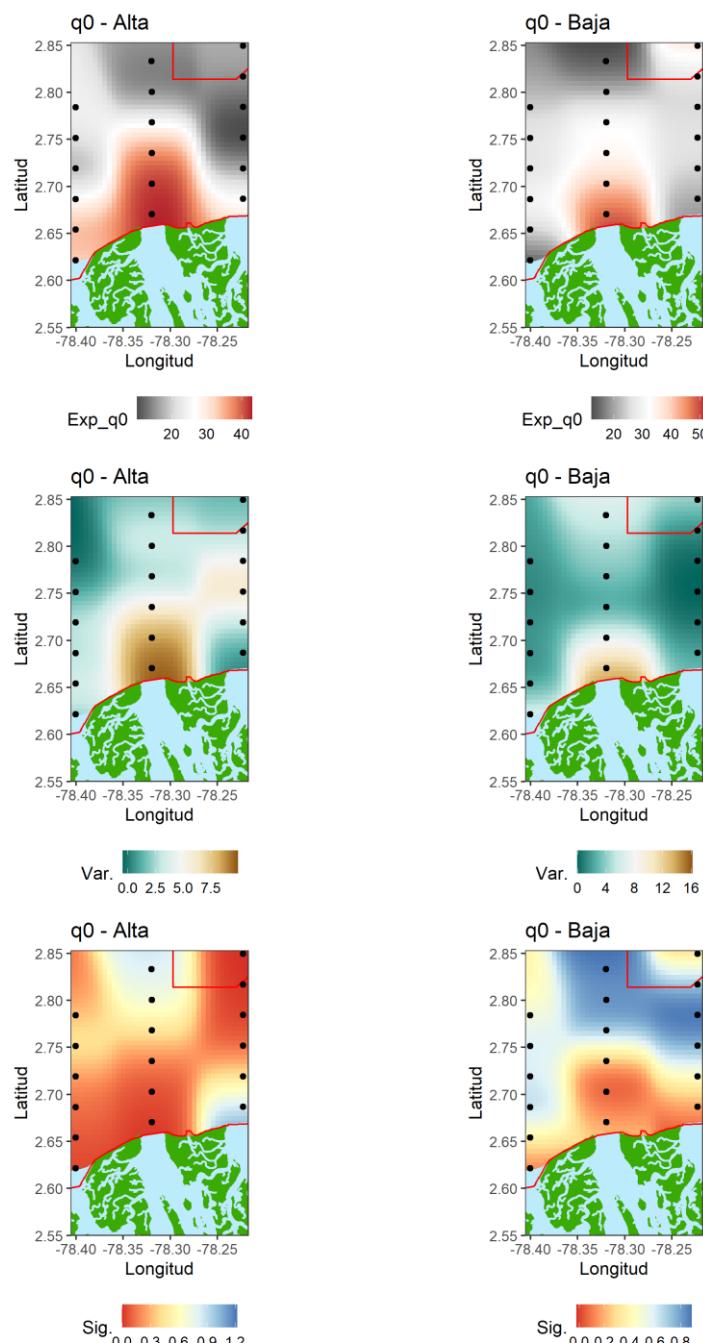


Figura 34. Distribución de la diversidad de nivel cero  ${}^0D$  del fitoplancton en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.



El valor más alto de la diversidad de nivel  $^1D$  fue de 21 para la marea alta en el transecto de Guascama y el menor fue de 2 para la marea baja en el mismo transecto. Esta medida de diversidad presentó una correlación espacial positiva y significativa en la marea alta ( $I$  de Moran= 0.11  $p < 0.1$ ) pero para la marea baja no presentó ningún tipo de estructura espacial siendo su variación completamente azarosa ( $I$  de Moran = -0.14  $p = 0.8$ ) (Figura 35).

La mayor fuente de variación para la estructura espacial se presentó en la bocana Guascama entre la cuarta y la sexta estación.

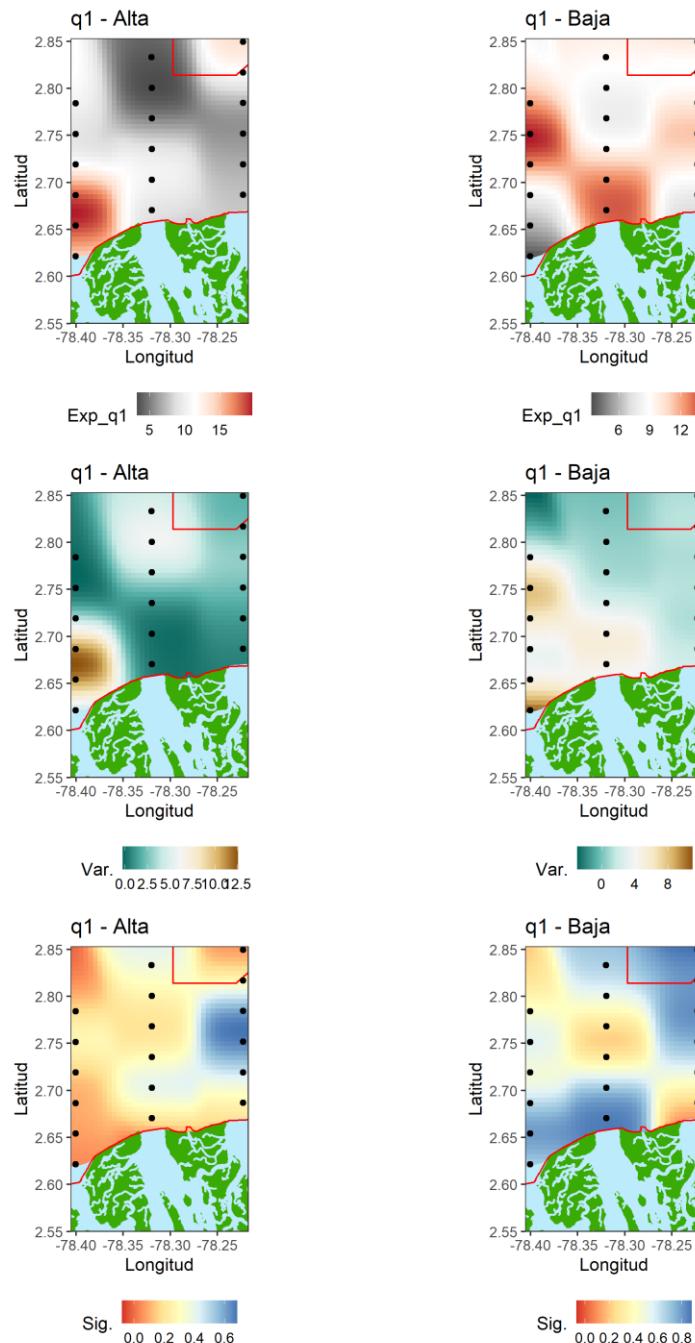


Figura 35. Distribución de la diversidad de nivel  $^1D$  del fitoplancton en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.



El valor más alto de la diversidad de nivel 2D fue de 17 para la marea alta en el transecto de Guascama y el menor fue de 1.49 para la marea baja en el mismo transecto. Esta medida de diversidad no presentó una correlación espacial en ninguno de los períodos mareales (Marea Alta I de Moran= 0.01 p =0.2, Marea Baja I de Moran = -0.18 p =0.84) (Figura 36).

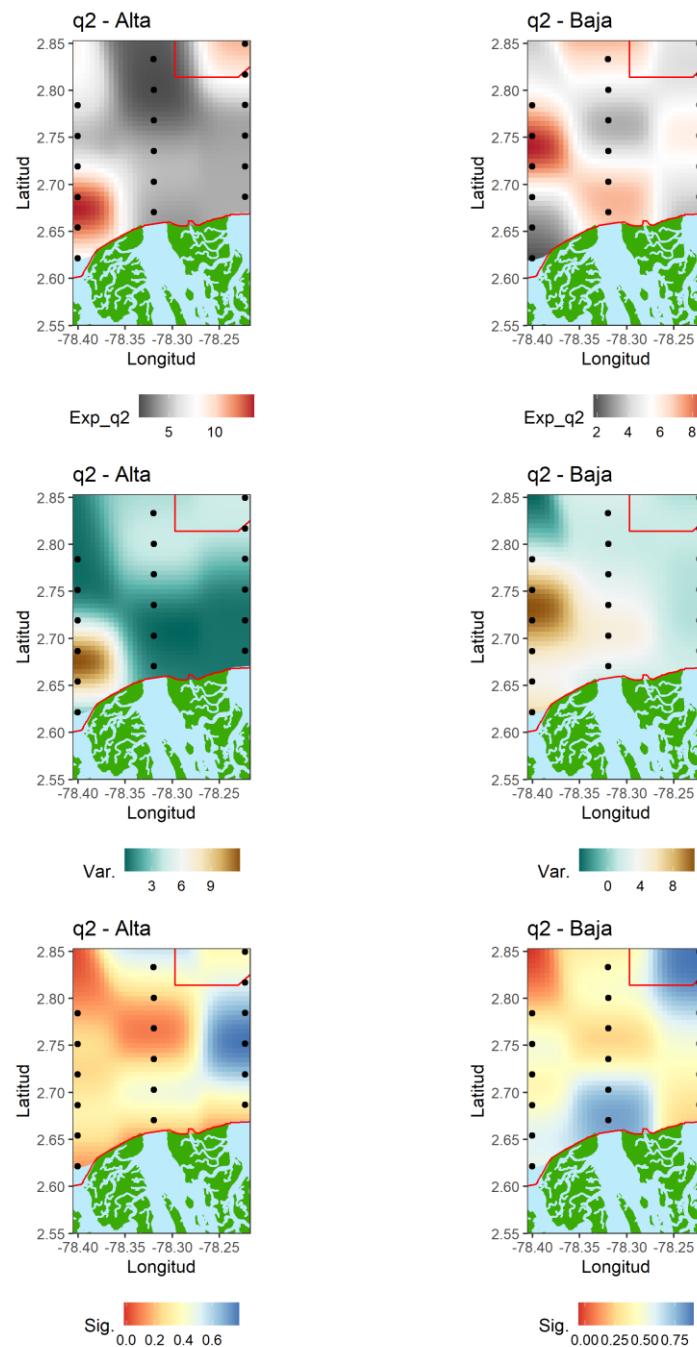


Figura 36. Distribución de la diversidad de nivel 2D del fitoplancton en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.



El valor máximo de densidad celular que se encontró fue de  $29298 \text{ cel.L}^{-1}$  y el valor mínimo fue de  $360 \text{ cel.L}^{-1}$ , estos valores presentaron una tendencia a aumentar en el sector costero de los transectos. La densidad celular presentó una autocorrelación espacial positiva en la marea alta ( $I$  de Moran = 0.15  $p < 0.01$ ) y una correlación positiva pero no significativa con  $p < 0.05$ , pero siendo significativa con un  $p < 0.1$  ( $I$  de Moran = 0.09  $p = 0.07$ ). La mayor fuente de variación significativa encontrada con el  $I$  de Moran local se ubicó justo en la boca de Sanquianga (Figura 37).

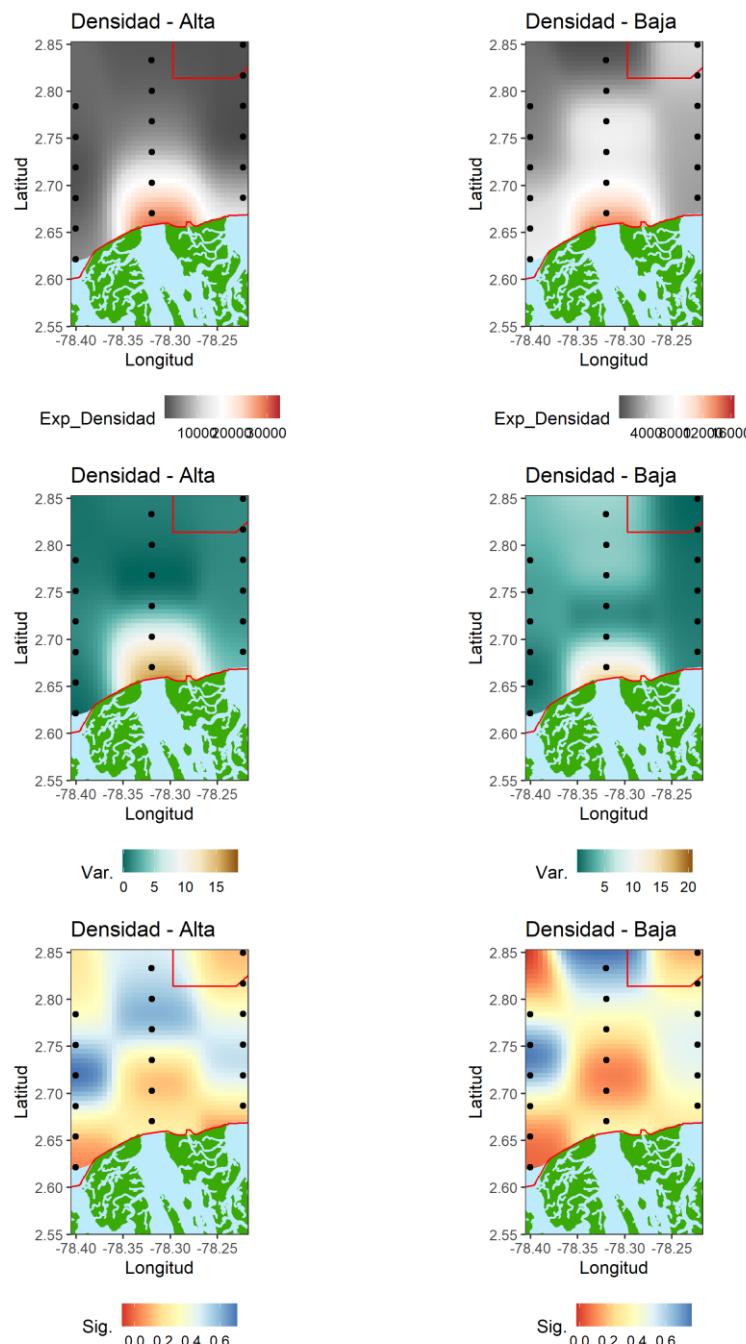


Figura 37. Distribución de la densidad celular de fitoplancton en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.



La clorofila presentó los mayores valores en el sector costero de los transectos de Sanquianga y Amarales durante la marea baja. Los mayores valores de concentración registrados fueron de  $4.99 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  y los menores fueron de  $0.33 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ . Se encontró una correlación positiva y significativa para la marea baja ( $I$  de Moran =  $0.17$   $p < 0.05$ ) pero no para la marea alta ( $I$  de Moran =  $0.0-0.15$   $p = 0.56$ ). La principal fuente de variación de la concentración de la clorofila a en la marea baja se encontró en las inmediaciones de la bocana de Amarales y Sanquianga en el sector costero (Figura 38).

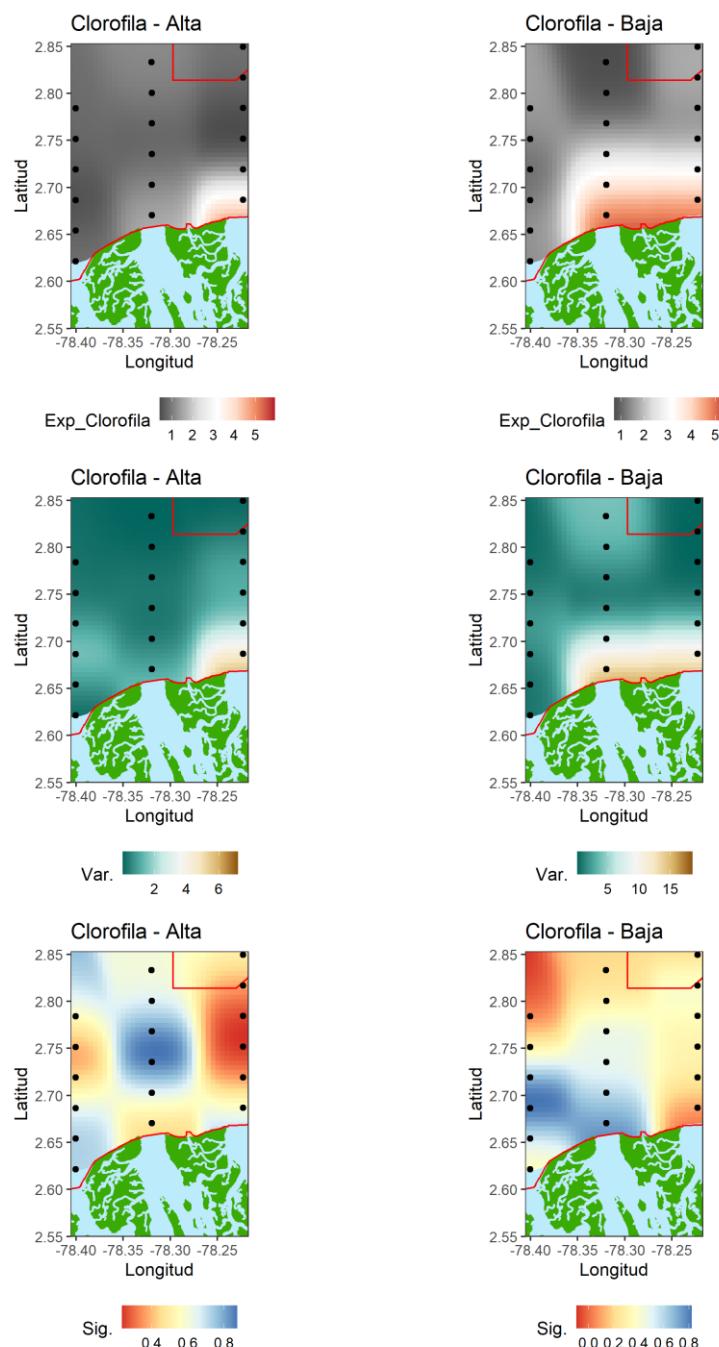


Figura 38. Distribución de la concentración de clorofila a en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.



La estimación de los diferentes niveles de diversidad, basados en la densidad colectada (Número de individuos) para los transectos mostró que la diversidad  ${}^0D$  es mayor en el transecto del Sanquianga con un valor de aproximadamente 110 especies, seguido del transecto Guascama con aproximadamente 90 especies y por último el transecto Amarales con 75 especies, encontrándose diferencias entre estas. Para la diversidad  ${}^1D$  y  ${}^2D$ , no se encontraron diferencias entre los transectos (Figura 39). Al comparar las mareas no se encontraron diferencias en la medición de ninguno de los niveles de diversidad, si embargo para los sectores se presentaron diferencias en la diversidad  ${}^0D$  donde el sector costero fue mayor que el oceánico. La diversidad  ${}^1D$  y  ${}^2D$  no presentaron diferencias entre los sectores (Figura 39).

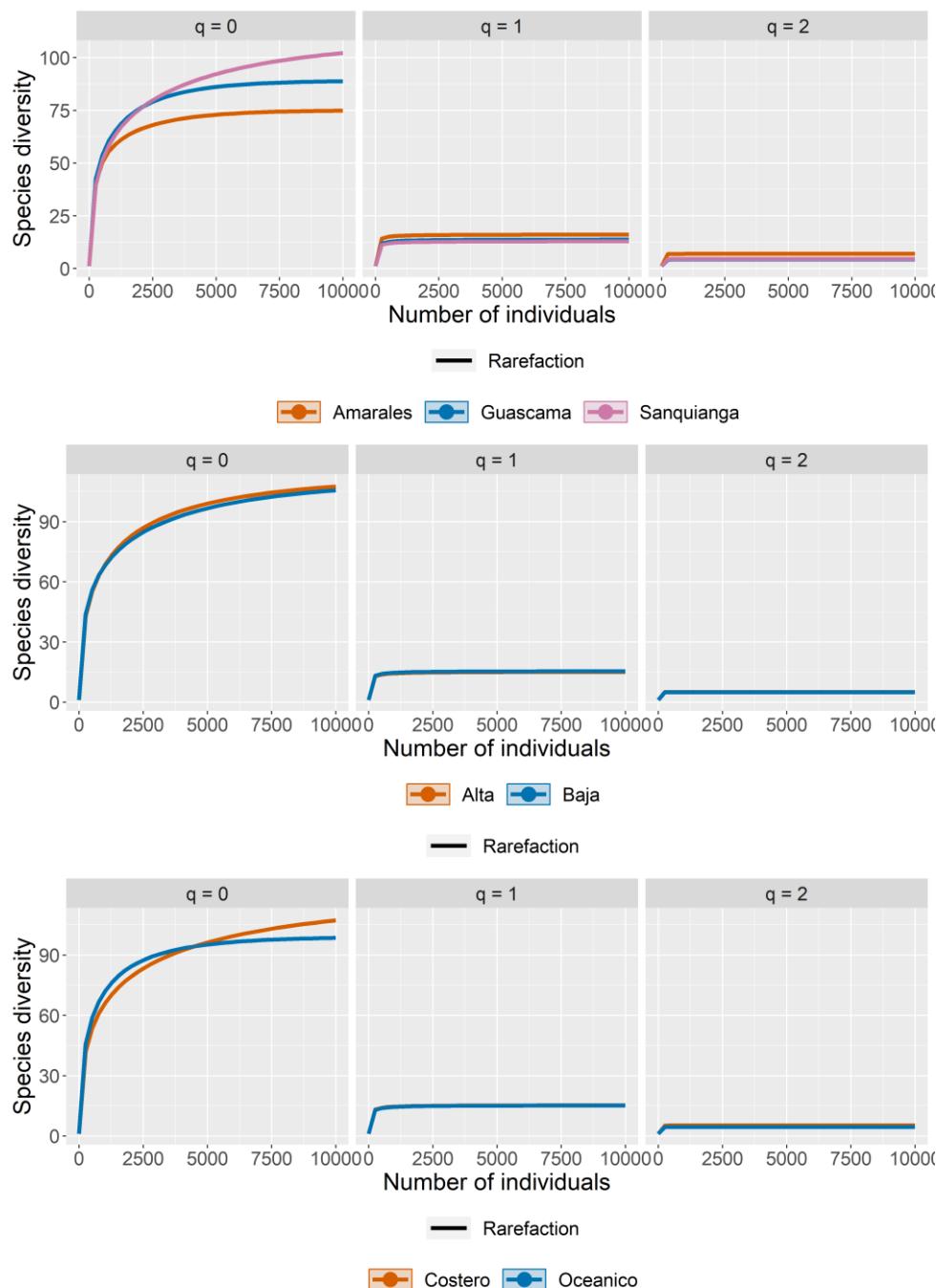


Figura 39. Estimación y extrapolación de la diversidad  ${}^0D$ ,  ${}^1D$  y  ${}^2D$  del fitoplancton, en los transectos, períodosmareales y sectores en el delta del río Sanquianga.



El análisis de agrupamiento con el escalamiento multidimensional no métrico basado en la composición de las especies de fitoplancton no evidenció la separación de ninguna de las categorías evaluadas y no se formaron grupos independientes, evidenciando homogeneidad espacial en la composición (Figura 40).

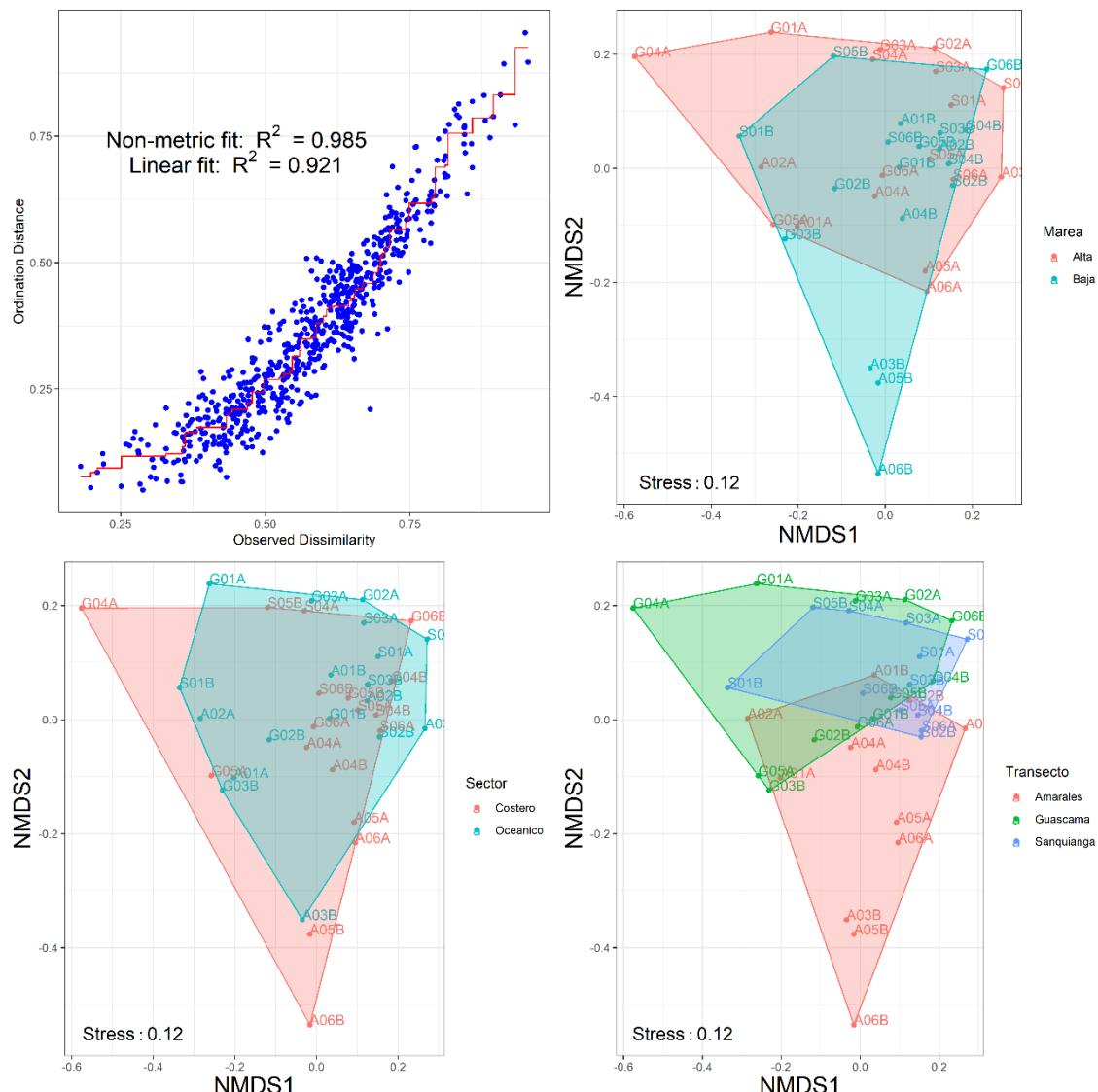


Figura 40. Análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) basado en la composición de especies de fitoplancton agrupado por mareas, sectores y transectos.

#### Ictioplancton

Se identificaron un total de 33 especies y UTO, con 13 familias de la cual la más diversa fue Scianidae seguida de Engraulidae, Scombridae y Gobiidae.



Tabla 3. Listado de especies del ictioplancton de la desembocadura del delta Sanquianga. (+) Presencia en cada transecto.

Taxón	Sitios		
	Amarales	Guascama	Sanquianga
<b>Achiridae</b>			
<i>Achirus sp.1 cf:A. kluzingeri</i>	+	+	+
<i>Achiridae sp.1</i>	+	+	+
<b>Carangidae</b>			
<i>Seriola lalandi</i>	+		+
<i>Chloroscombrus orqueta</i>	+	+	+
<b>Engraulidae</b>			
<i>Anchoa sp.1</i>	+	+	
<i>Anchoa sp.2</i>	+	+	+
<i>Cetengraulis mysticetus</i>	+	+	+
<b>Gerreidae</b>			
<i>Gerreidae sp.1</i>	+	+	
<b>Gobiesocidae</b>			
<i>Gobiesox sp.1</i>	+	+	+
<b>Gobiidae</b>			
<i>Gobiidae sp.7</i>	+	+	+
<i>Gobiidae cf: Gobulus sp.1</i>	+	+	+
<i>Gobiidae sp.8</i>	+		+
<b>Haemulidae</b>			
<i>Haemulidae sp.1</i>	+	+	+
<b>Kyphosidae</b>			
<i>Kyphosidae sp.1</i>	+		+
<b>Paralichthyidae</b>			
<i>Paralichthyidae sp.1</i>	+	+	
<b>Sciaenidae</b>			
<i>Larimus sp.4</i>	+		+
<i>Sciaenidae cf:Menticirrhus sp.</i>	+		+
<i>Sciaenidae cf: Larimus sp.</i>	+		+
<i>Stellifer sp.2</i>	+	+	
<i>Cynoscion sp.1</i>	+	+	+
<i>Sciaenidae sp. cf: Cynoscion sp.</i>	+	+	+
<i>Sciaenidae sp.1</i>	+	+	+
<i>Stellifer sp.1</i>	+	+	
<i>Menticirrhus sp.2</i>	+		
<i>Larimus sp.1</i>	+	+	+
<i>Stellifer sp.3</i>	+	+	
<i>Isopisthus remifer</i>	+	+	+
<b>Scombridae</b>			
<i>Scomber japonicus</i>	+	+	+
<i>Scomber sp1</i>	+	+	
<i>Scombridae sp.1</i>	+	+	



Taxón	Sitios		
	Amarales	Guascama	Sanquianga
<b>Serranidae</b>			
<i>Serranidae sp.1</i>	+	+	
<i>Hemanthias sp.1</i>	+	+	+
<b>Tetraodontidae</b>			
<i>Sphoeroides cf. lobatus</i>	+	+	
NO ID.	+	+	+

Combinando las diferentes medidas de biodiversidad (<sup>0</sup>D, <sup>1</sup>D y <sup>2</sup>D) del fitoplancton, se encontraron diferencias significativas entre los períodos mareales MRPP ( $A = 0.05$ ,  $p < 0.01$ ) y entre los transectos ( $A = 0.17$ ,  $p < 0.01$ ), pero no se encontró diferencias entre los sectores ( $A = -0.018$ ,  $p = 0.96$ ), (Figura 33).

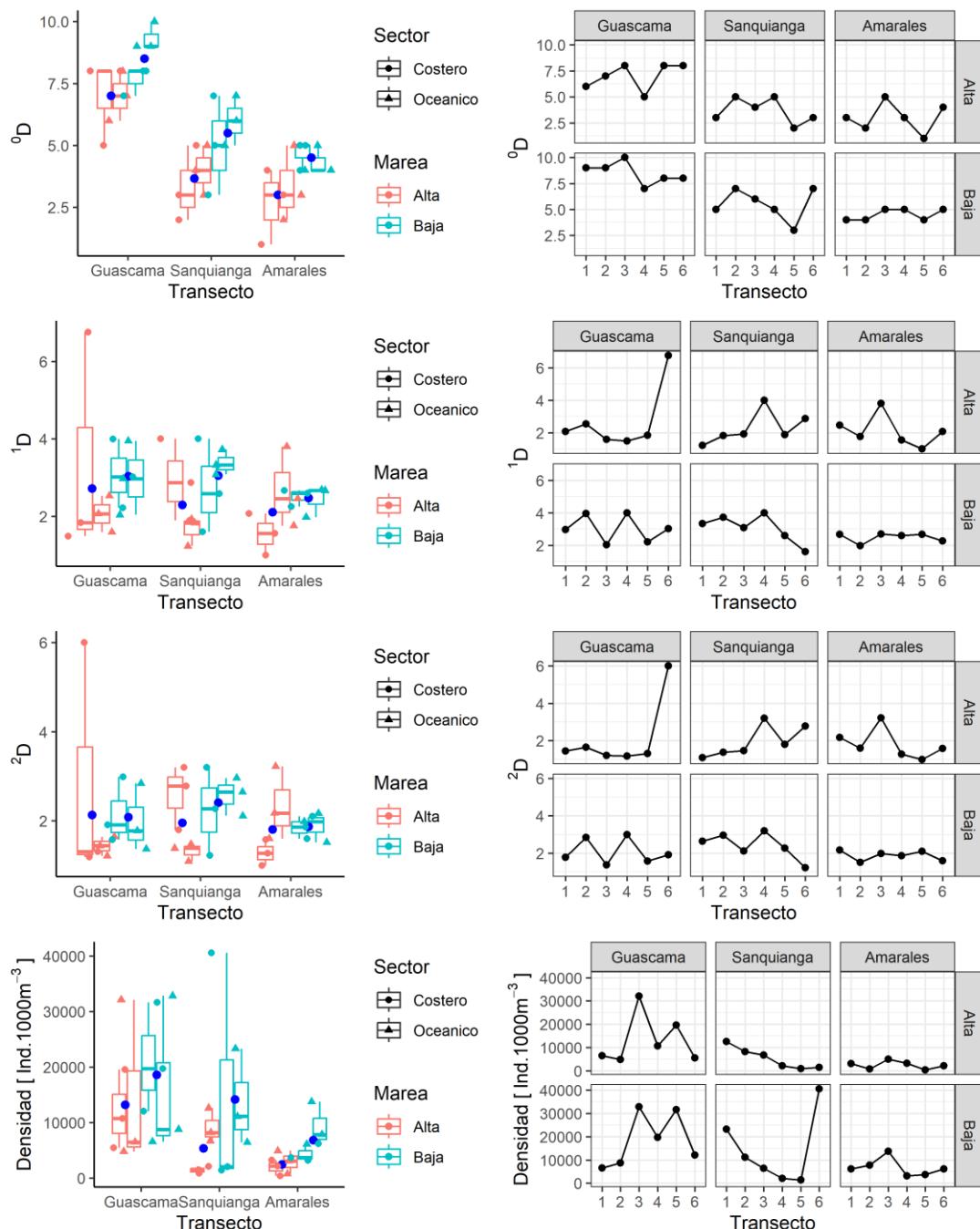


Figura 41. Diagrama de cajas y líneas mostrando la distribución de medidas de la biodiversidad  ${}^0D$ ,  ${}^1D$  y  ${}^2D$ , la densidad de individuos de Ictioplancton, entre los períodos mareales, los sectores y los transectos de las bocanas de delta del río Sanquianga.

El valor más alto de la diversidad de nivel  ${}^0D$  fue de 10 para la marea baja en el transecto de Amarales en el sector costero y el menor fue de 1 para la marea baja en el transecto de Sanquianga. Esta medida de diversidad presentó una correlación espacial positiva y altamente significativa en ambos períodos mareales (Marea Alta: I de Moran = 0.24 p <0.01, Marea Baja: I de Moran = -0.38 p <0.01) (Figura 34). La mayor fuente de variación para la estructura espacial en el transecto de Guascama moviéndose desde la boca del río en marea alta hasta la porción medio del transecto en marea baja (Figura 42).

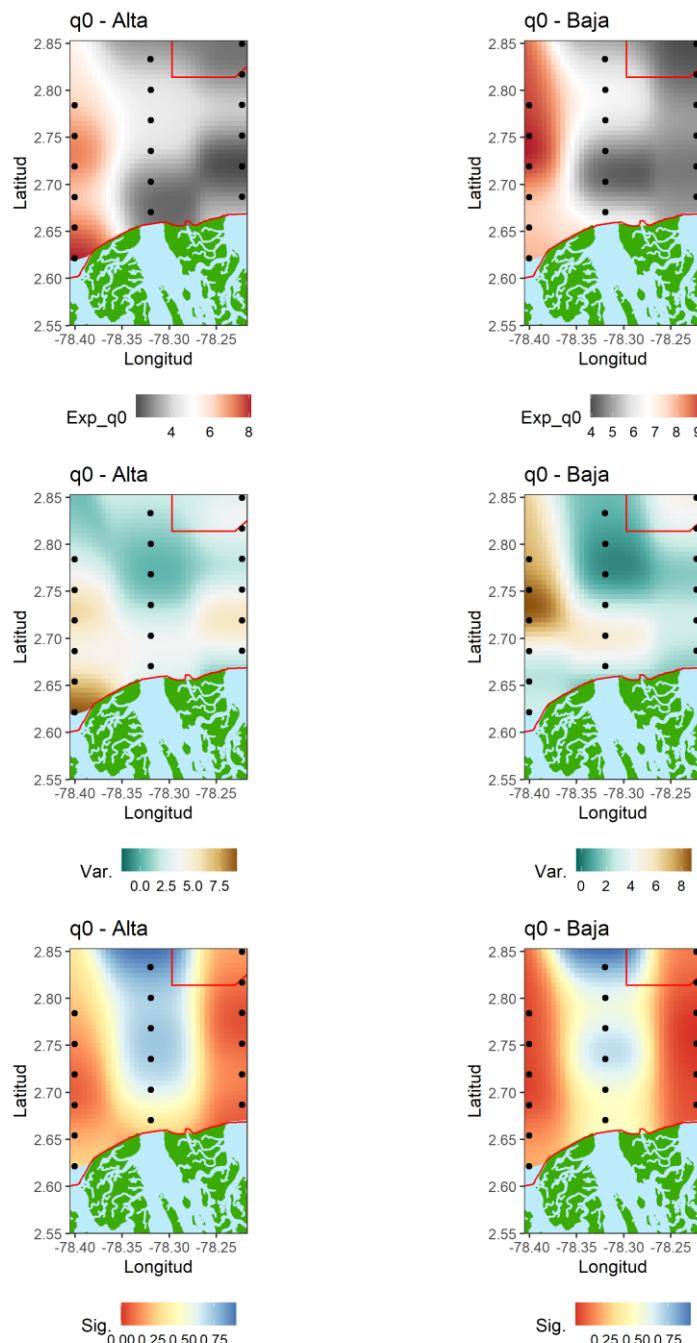


Figura 42. Distribución de la diversidad de nivel cero  ${}^0D$  del ictioplancton en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

El valor más alto de la diversidad de nivel  ${}^1D$  fue de 6.7 para la marea alta en el transecto de Guascama y el menor fue de 1 para la marea baja en el mismo transecto. Esta medida de diversidad no presentó correlación espacial en la marea alta ( $I$  de Moran = -0.65  $p = 0.74$ ) pero para la marea baja se presentó una correlación positiva ( $I$  de Moran = 0.14  $p < 0.05$ ) (Figura 42Figura 35).

La mayor fuente de variación para la estructura espacial se presentó en el transecto Guascama entre la segunda y la cuarta estación.

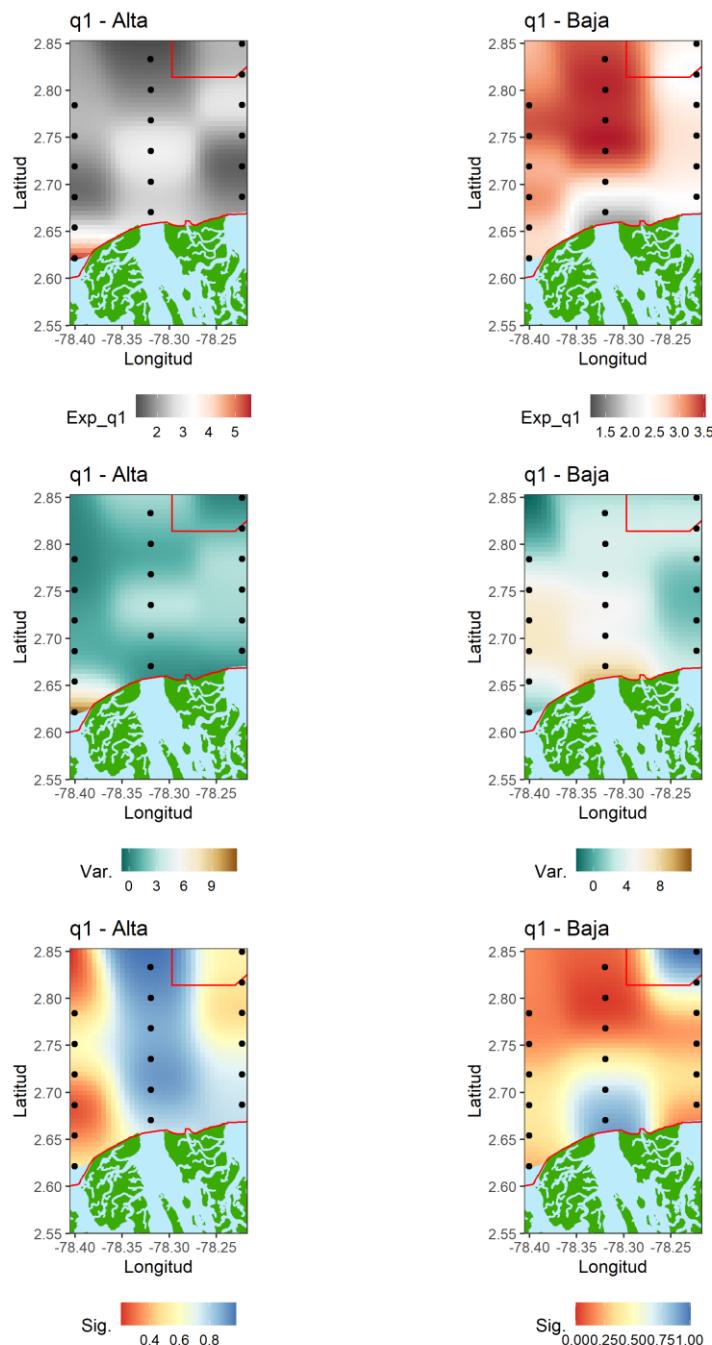


Figura 43. Distribución de la diversidad de nivel cero 1D del ictioplancton en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

El valor más alto de la diversidad de nivel 2D del ictioplancton fue de 6 para la marea alta en el transecto de Guascama en el sector costero y el menor fue de 1 para la marea baja en el transecto de Sanquianga. Esta medida de diversidad no presentó una correlación espacial en ninguno de los períodosmareales (Marea Alta I de Moran= -0.33 p =0.6, Marea Baja I de Moran = 1.1 p =0.1) (Figura 44 ).

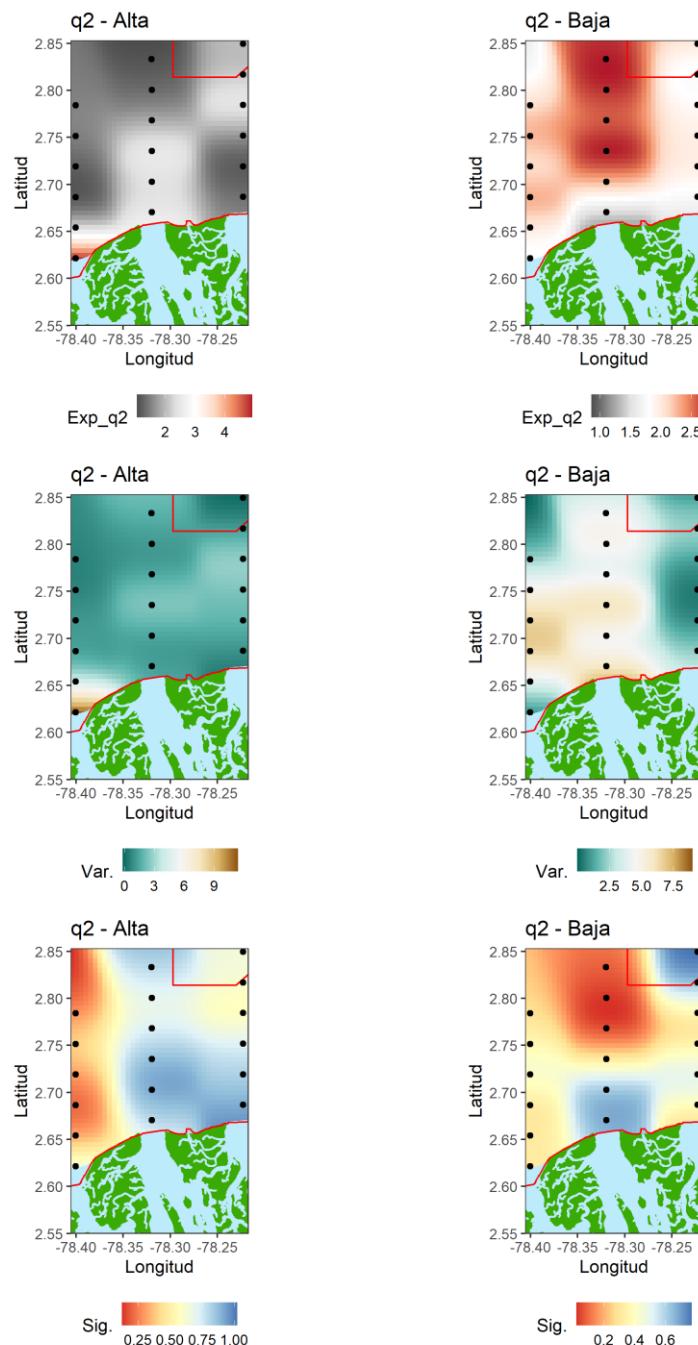


Figura 44. Distribución de la diversidad de nivel 2D del ictioplancton en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

El valor máximo de densidad que se encontró fue de 40587.7 ind. 1000 m<sup>-3</sup> y el valor mínimo fue de 375 ind. 1000 m<sup>-3</sup>, estos se presentaron en el transecto Sanquianga en la marea baja. La densidad presentó una autocorrelación espacial positiva en la marea alta ( $I$  de Moran = 0.11 p <0.05) y una correlación positiva significativa en marea baja ( $I$  de Moran = 0.15 p <0.05). la mayor fuente de variación significativa encontrada con el  $I$  de moran local se ubicó en el transecto Guascama en la estación 3 (Figura 37).

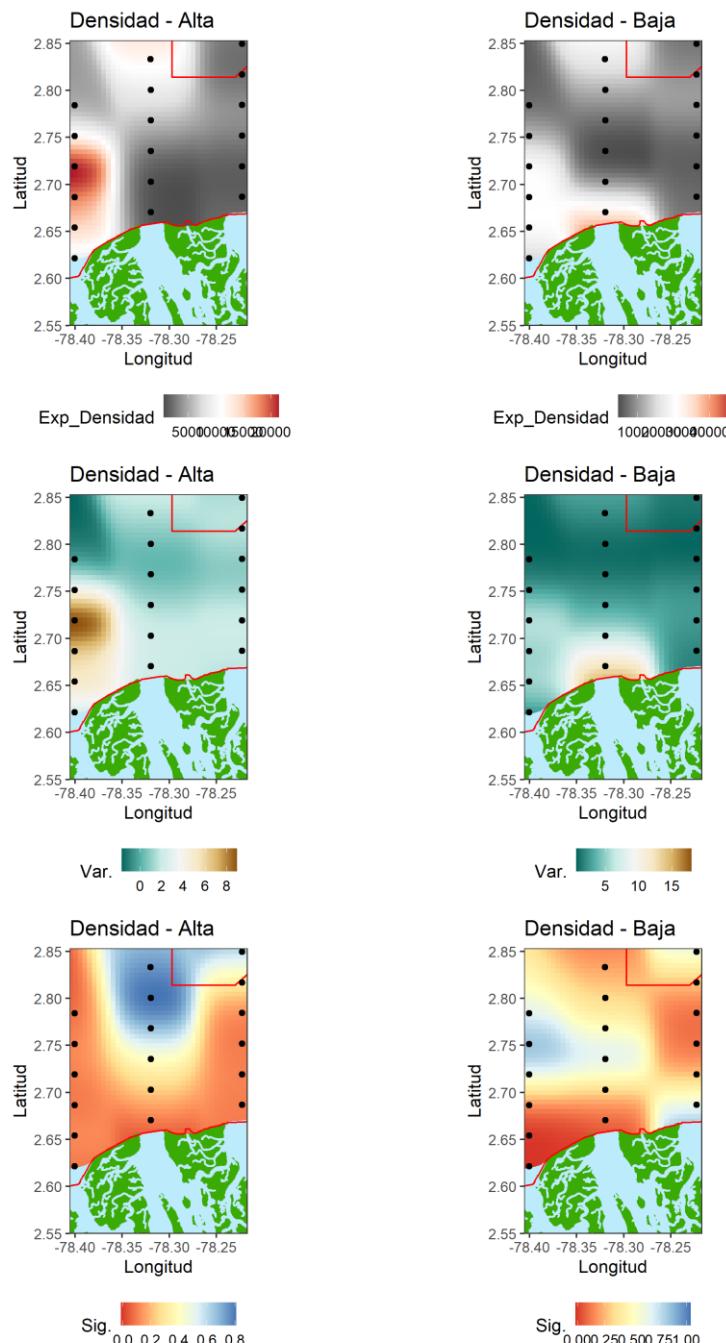


Figura 45. Distribución de la densidad del ictioplancton en relación con la distribución de la varianza espacial y la significancia de la prueba local de Moran para determinar autocorrelación espacial.

La estimación de los diferentes niveles de diversidad para el ictioplancton, basados en la densidad colectada (Número de individuos) para los transectos mostró que la diversidad  ${}^0D$  es mayor en el transecto del Guascama con un valor de aproximadamente 26 especies, seguido del transecto Sanquianga con aproximadamente 22 especies y por último el transecto Amarales con 19 especies, encontrándose diferencias entre estas. Para la diversidad  ${}^1D$ , los transectos Amarales y Sanquianga no presentaron diferencias, pero la  ${}^1D$  en Guascama fue muy inferior a los demás transectos. Para la diversidad  ${}^2D$ , los tres transectos presentaron diferencias siendo el de mayor diversidad el transecto de Sanquianga, seguido por Amarales y Guascama. Para las mareas, los tres niveles de diversidad presentaron diferencias siendo la marea baja la de mayor



diversidad para  ${}^0D$ ,  ${}^1D$  y  ${}^2D$  del ictioplancton. Para los sectores, también se encontraron diferencias en todos los niveles de diversidad siendo el sector costero más diverso que el sector oceánico (Figura 46).

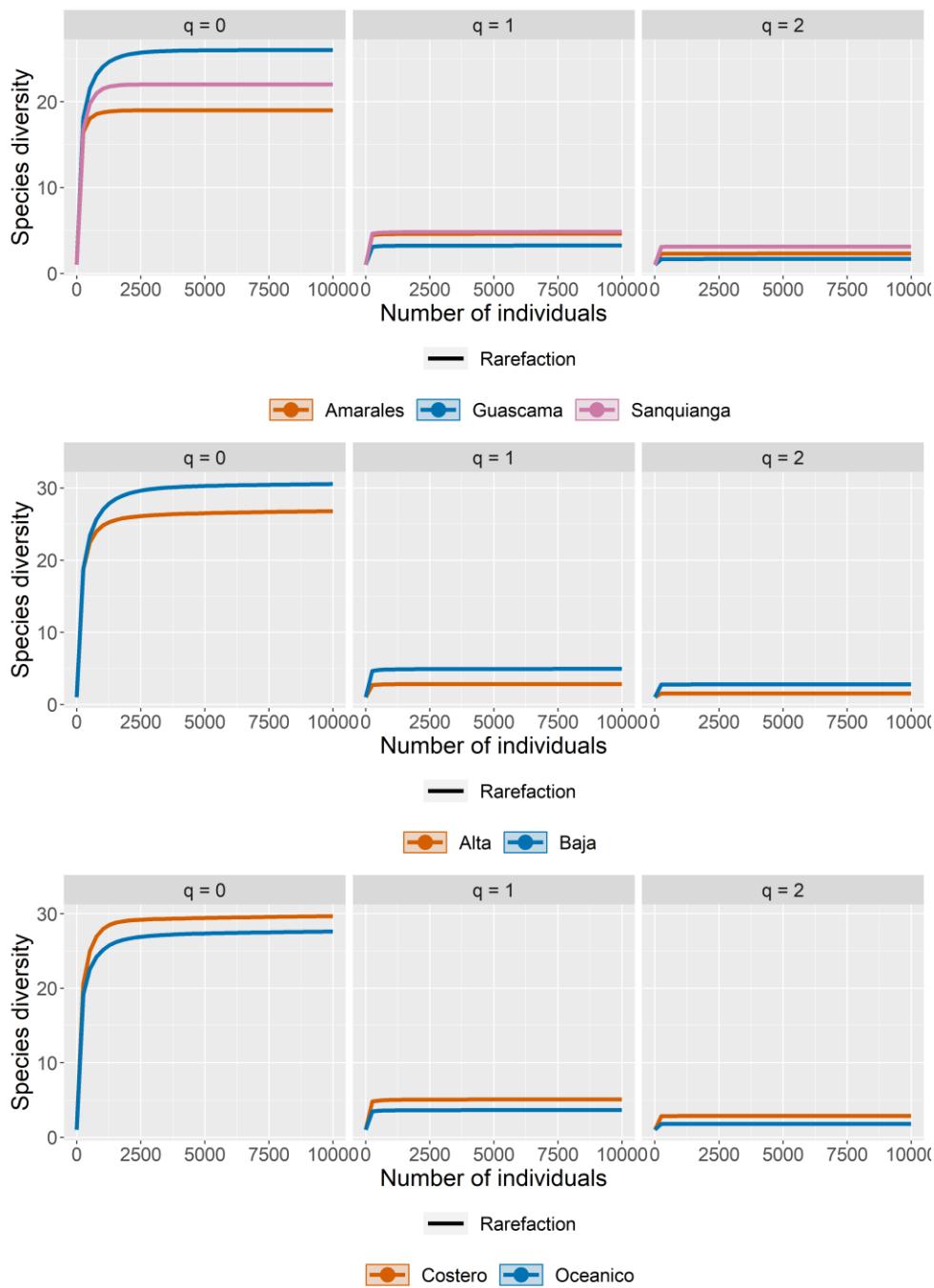


Figura 46. Estimación y extrapolación de la diversidad  ${}^0D$ ,  ${}^1D$  y  ${}^2D$  del ictioplancton, en los transectos, períodosmareales y sectores en el delta del río Sanquianga.

El análisis de agrupamiento con el escalamiento multidimensional no métrico basado en la composición de las especies de ictioplancton no evidenció la separación de ninguna de las categorías evaluadas y no se formaron grupos independientes, evidenciando homogeneidad espacial en la composición (

Figura 47).

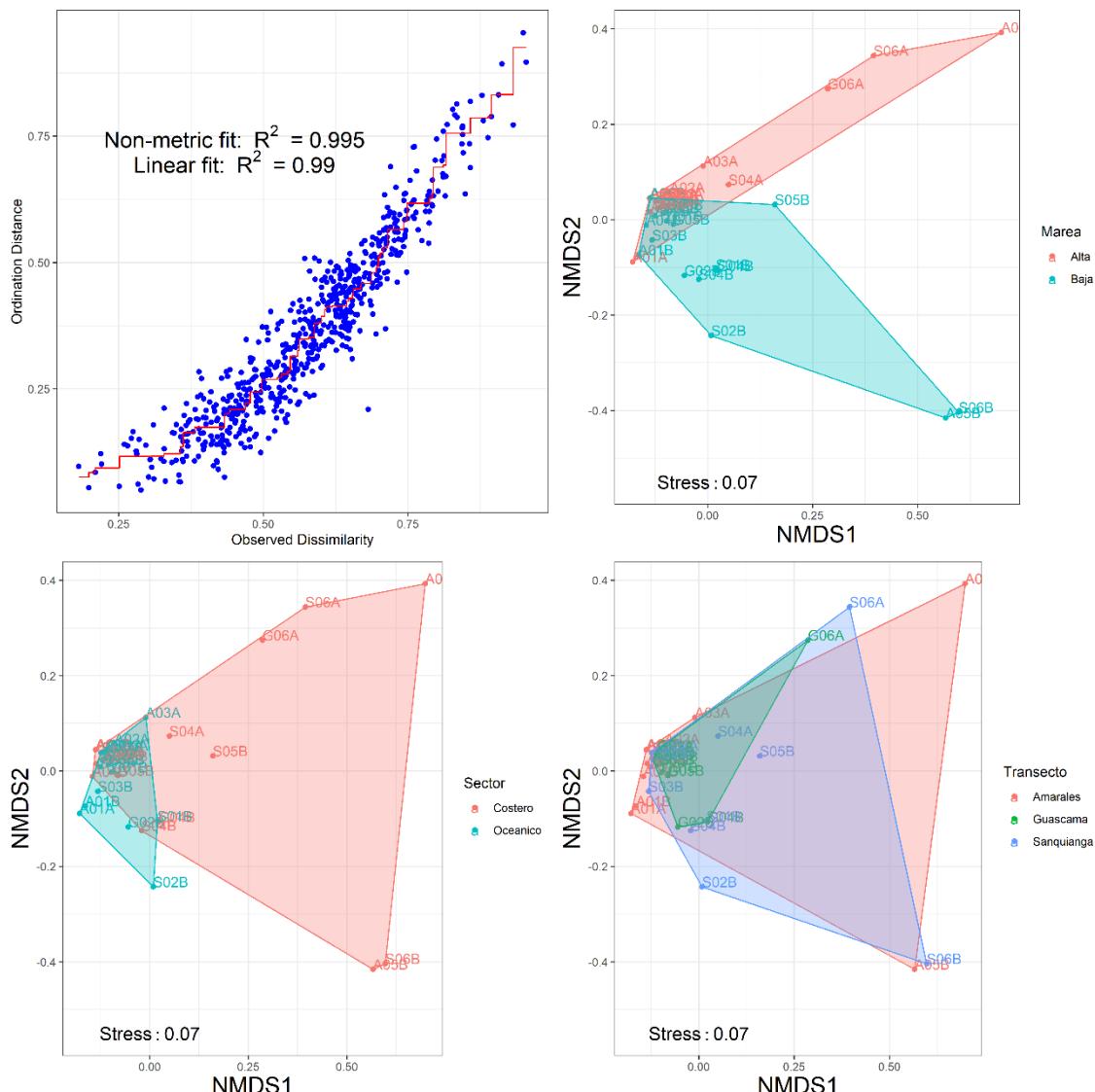


Figura 47. Análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) basado en la composición de especies de ictioplancton agrupado por mareas, sectores y transectos.

#### Relaciones de congruencia de la diversidad

Al evaluar la correspondencia de los niveles de diversidad entre los ensambles de fitoplancton con la prueba parcial de mantel, esta solo fue significativa entre la densidad del ictioplancton y la concentración de clorofila a del fitoplancton ( $r_M = 0.23$ ,  $p < 0.01$ ) (Figura 48).

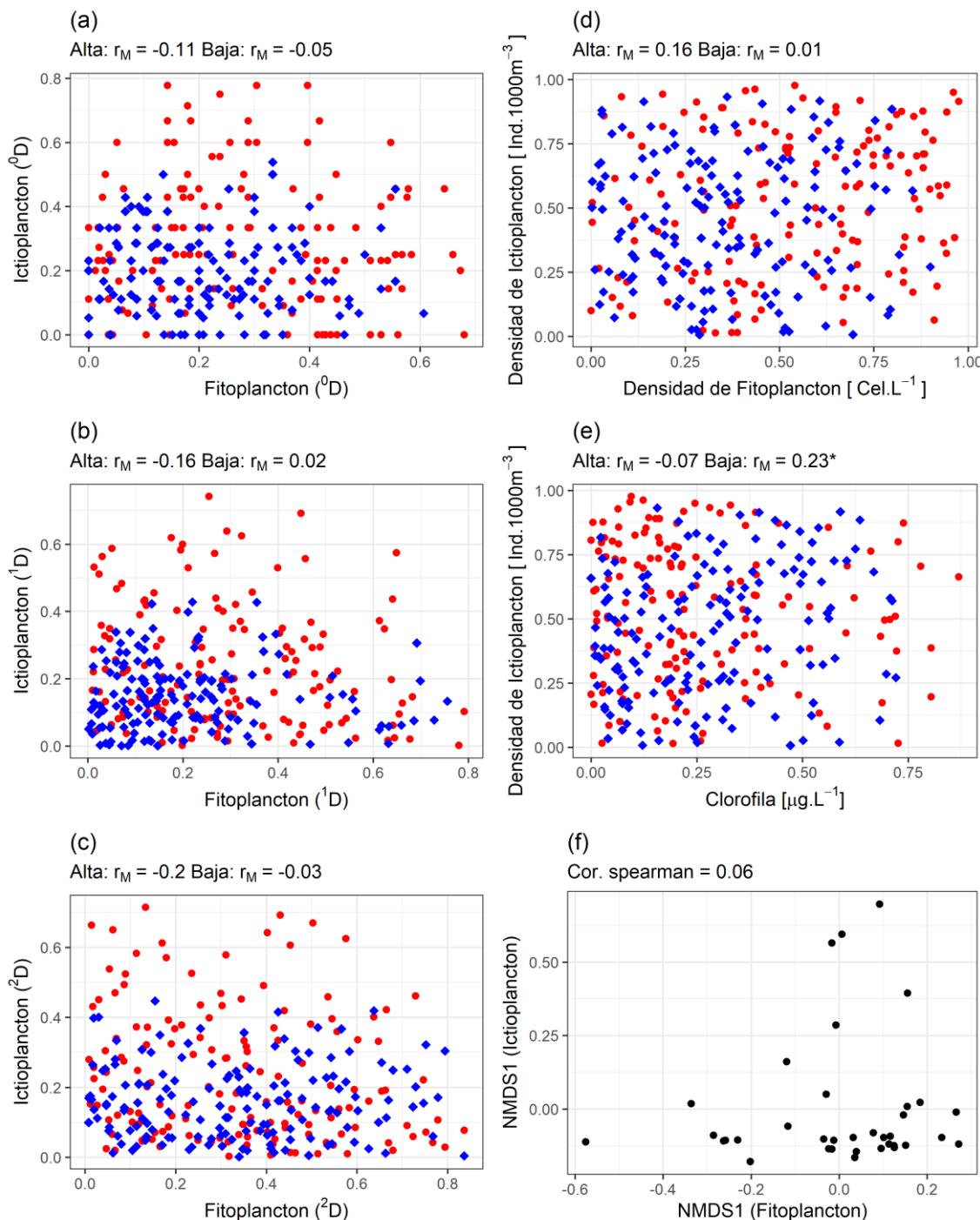


Figura 48. Correspondencia entre los niveles de diversidad y la densidad del ensamble de fitoplancton y el ictioplancton examinada a través de la relación entre las matrices de similitud con la prueba parcial de mantel. (a) Correspondencia de la diversidad  ${}^0D$  entre el fitoplancton y el ictioplancton. (b) Correspondencia de la diversidad  ${}^1D$  entre el fitoplancton y el ictioplancton. (c) Correspondencia de la diversidad  ${}^2D$  entre el fitoplancton y el ictioplancton. (d) Correspondencia de la densidad entre el fitoplancton y el ictioplancton. (e) Correspondencia de densidad del ictioplancton y la concentración de clorofila a. (f) Correspondencia de la composición entre el fitoplancton y el ictioplancton medida como la primera dimensión del NMDS. Los puntos rojos representan la marea alta y los azules la marea baja. \*la correlación es significativa.

Para determinar la relación entre las variables y las medidas de diversidad se realizó una prueba parcial de mantel a múltiples relaciones. Esta prueba mostró correlaciones positivas y



significativas constantes entre las variables fisicoquímicas medidas y la densidad y diversidad de nivel cero  $^0D$ . Las variables con las cuales se encontraron correlaciones significativas fueron los nitratos, fosfatos, silicatos, oxígeno disuelto, transparencia, los sólidos suspendidos, la TSI del Secchi, la mediana y el rango intercuartílico de la temperatura medida en la columna de agua y la salinidad superficial (Figura 49 y Figura 50).

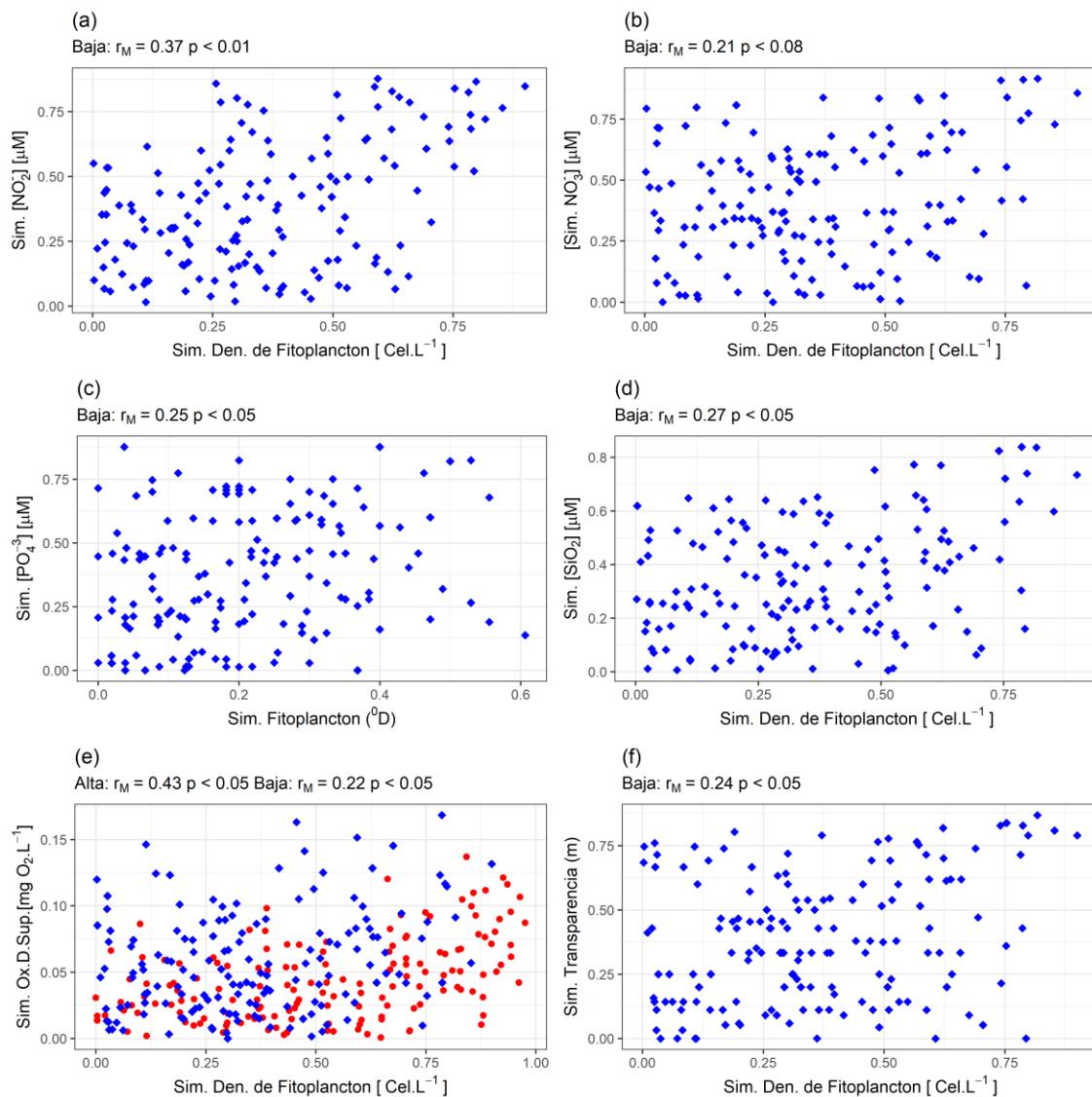


Figura 49. Gráficos de dispersión de las matrices de similitud entre estaciones para cada período mareal entre las medidas de diversidad del fitoplancton y las variables con las que se encontró una correlación significativa con la prueba parcial de Mantel.

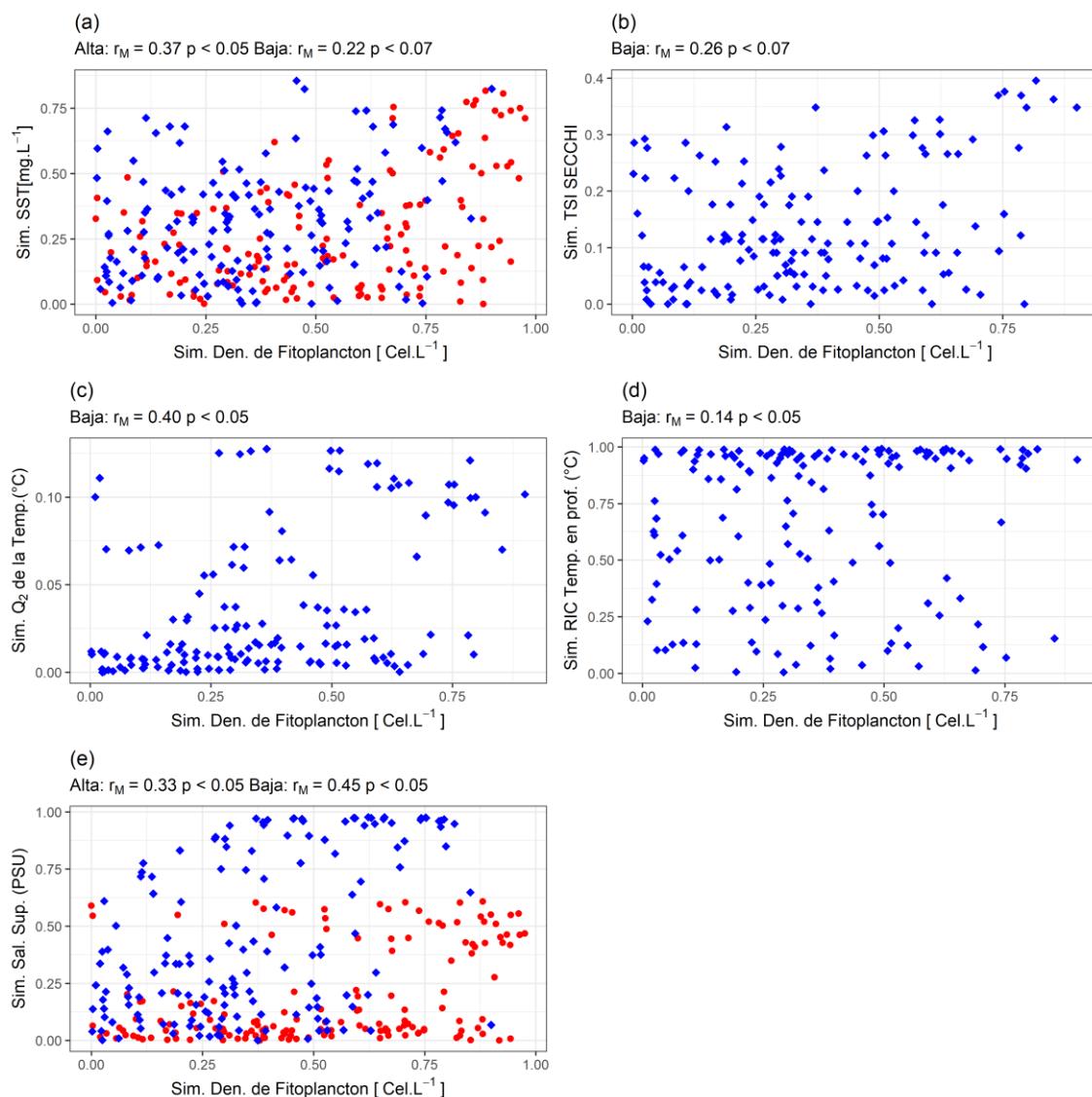


Figura 50. Gráficos de dispersión de las matrices de similitud entre estaciones para cada período mareal entre las medidas de diversidad del fitoplancton y las variables con las que se encontró una correlación significativa con la prueba parcial de Mantel.



## 7 Discusión

En este estudio se examinaron 20 variables fisicoquímicas en el delta del río Sanquianga durante los períodos mareales. Uno de los hallazgos más importantes fue la presencia de una sólida estructura espacial en la mayoría de las variables fisicoquímicas medidas. Sin embargo, se observó que la temperatura superficial y la variabilidad de la salinidad en la columna de agua, representada por el rango intercuartílico, no mostraron ninguna estructura espacial durante los períodos mareales evaluados.

Las estructuras espaciales que se observaron en este estudio son comunes en investigaciones ambientales y se encuentran con mayor frecuencia en ambientes deltaicos debido a la influencia de los ríos ríos (Legendre, 1993; Legendre & Troussellier, 1988). Sin embargo, debido a la presencia de autocorrelación, no fue posible realizar pruebas estadísticas convencionales para comparar los períodos mareales.

Al revisar la interpolación de las variables y su comportamiento en los dos períodos mareales, se observaron diferentes fuentes de variabilidad. Por ejemplo, la principal fuente de variación para los nitratos se encontró en la bocana de Amarales, mientras que para los nitratos la principal fuente fue la bocana opuesta de Guascama. Esto es llamativo porque la separación entre estas bocanas y la unión de los ríos Sanquianga y Satinga es de aproximadamente 20 kilómetros, lo que sugiere que la fuente de nitratos se encuentra en el cauce del río Amarales y no proviene aguas arriba, ya que no se observa mezcla entre las tres bocanas. Para confirmar esto, sería necesario contar con datos separados de cada una de estas aguas.

En el caso de los fosfatos, se identificó la bocana de Sanquianga como la principal fuente, la cual puede tener una contribución entre el tramo de la bocana y la zona donde se separan los cauces principales. Es importante destacar que la descarga y el flujo de cada una de estas bocanas también podrían influir en los patrones diferenciales de las fuentes de nutrientes.

En general, se puede observar que hay dos fuentes diferenciales que contribuyen a las variables fisicoquímicas. Una de ellas es la zona de las bocanas, que representa la principal fuente de variabilidad de los nutrientes, el pH, el TSI del secchi, la densidad y la salinidad superficial y otra es el sector oceánico del área de estudio en donde está la mayor fuente de variabilidad de la transparencia y de todas las variables que fueron medidas en la columna de agua como el oxígeno disuelto, la salinidad la densidad y la temperatura.

Las únicas variables que no presentaron estructura espacial en ninguna de los dos períodos mareales fue la temperatura superficial del mar y el rango intercuartílico de la salinidad medida en la columna de agua y debido a esto se pudo realizar las comparaciones de rango para determinar si existían diferencias entre las categorías propuestas para el estudio. La temperatura superficial del mar no presentó ninguna diferencia entre los períodos mareales, los sectores y los transectos, los valores de esta variable están distribuidos de manera completamente aleatoria.

Las medidas de diversidad para el fitoplancton en general fueron mas independientes con respecto a la estructura espacial presentadas por las variables fisicoquímicas. Solo la diversidad de nivel cero  $^0D$  en la marea alta presentó autocorrelación espacial siendo la principal fuente de riqueza de especies la bocana de río Sanquianga y la diversidad de nivel uno  $^1D$  que representa a las especies más comunes (Chao et al., 2014) presentó una correlación espacial no muy significativa, pero en el escenario tratado se considera el valor de significancia de  $p < 0.1$  como significativo (Thiese et al., 2016). La distribución espacial de los demás valores de diversidad fue completamente aleatoria con respecto a área estudiada. La densidad del fitoplancton presentó una distribución agregada y la distribución espacial fue significativa teniendo como principal fuente de la densidad celular la bocana del río Sanquianga. La clorofila presentó un patrón contrario con respecto a los períodos mareales. Durante la marea alta la distribución de la



concentración de la clorofila a no mostró ninguna estructura espacial mientras que durante la marea baja la estructura espacial fue significativa, siendo la principal fuente de variación las bocanas de Amarales y Sanquianga.

El presente estudio ha identificado un número de taxones mayor que los estudios realizados por Giraldo & Germán Ramírez (2010) quienes registraron 126 morfoespecies en la cuenca pacífica colombiana. Estos resultados podrían ser atribuidos a las descargas de nutrientes provenientes del delta, debido al flujo de escorrentía, lo que permite una mayor disponibilidad de nutrientes en las costas. La abundancia de recursos reduce la competencia, lo que favorece la coexistencia de un gran número de especies en un espacio reducido, moldeando así la estructura y tamaño del fitoplancton estuarino (Segura et al., 2013). Este fenómeno, conocido como la "paradoja del plancton" (Benincà et al., 2008), se observa en el presente estudio.

La presencia de un mayor número de especies de diatomeas en la comunidad fitoplanctónica, especialmente en ambientes estuarinos y marinos, parece ser una constante, como se ha observado en otros lugares como el golfo de Guayaquil en Ecuador (Gualancañay et al., 2003), Tumbes en Perú (Falero-Alama & de María Madrid-Ibarra, 2019) y el golfo de Nicoya en Costa Rica (Hargraves & Viquez, 1985). El silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es un compuesto importante para el crecimiento de las diatomeas, ya que forma parte de su pared celular. Las concentraciones de silicio juegan un papel crucial en las características de la comunidad fitoplancótica, y se ha determinado experimentalmente un umbral de concentración de  $2 \mu\text{M}$ . Cuando los valores de silicio son inferiores a este umbral, la comunidad está dominada por microorganismos flagelados, mientras que valores superiores favorecen la presencia de diatomeas en mayor proporción (Egge & Aksnes, 1992). En el presente estudio, se encontraron concentraciones de silicio que oscilaron entre  $18.6$  y  $31.8 \mu\text{M}$  de  $\text{SiO}_2$ , lo cual puede explicar la abundancia de diatomeas en la zona estudiada.

Se conoce que factores químicos como la cantidad de nutrientes ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{PO}_4$ ) son esenciales para el crecimiento, reproducción, actividades metabólicas de esta comunidad de microorganismos. En este trabajo que corrobora su influencia sobre la composición de la comunidad fitoplancótica, sin embargo, no se encontraron evidencias estadísticas de estas relaciones a pesar de controlar los efectos de la autocorrelación espacial a través de la prueba de Mantel. El aporte de compuestos nitrogenados y fosfatos en la zona puede estar dándose por la degradación de amonio y materia orgánica arrastrada por los ríos que alimentan el delta hasta la formación de nitritos y moléculas fosfatadas (Elmgren & Larsson, 2001; Rajasegar, 2003). Las áreas estuarinas se caracterizan por la variación constante de los factores químicos debido a las descargas de los ríos que son alteradas por factores como la época climática, condiciones geográficas y actividades antrópicas como la agricultura y ganadería. La concentración de nutrientes son factores que claramente controlan la biomasa y composición del fitoplancton, especialmente en ambientes estuarinos (Jacquet et al., 2006).

Aunque el análisis por nMDS no arroja diferencias, el hecho que algo más de la mitad de la similitud entre los sitios de muestreo sea aportada por especies que forman extensas cadenas de células (*Skeletonema constatum*, *Chaetoceros lorenzianus* y *Cha. diversus*) o densas agrupaciones celulares (*Planktoniella muriformis*), indica que este tipo de crecimiento puede estar otorgando ventaja en esta área estuarina sobre otras especies. Esto es debido que al tener un número mayor de células tiene una superficie más grande para captar nutrientes, permitiendo tener un mejor provecho de las altas concentraciones de estos aportada por la escorrentía del delta del Sanquianga.

Para el ictioplancton, la influencia de la estructura espacial estuvo mucho más marcada que para el caso de fitoplantcton. Los valores de riqueza medida por la diversidad de nivel cero  $\text{D}^0$  no presentaron una distribución aleatoria en ninguno de los dos períodosmareales. Parece que la principal fuente de riqueza en esta área es la bocana Guascama a lo largo de ambos sectores considerados, tanto el costero como el oceánico. Esto mismo ocurre con la densidad del fitoplantcton, que en ambas mareas se presentan estructuras espaciales agregadas pero las fuentes



de variación son diferentes. En marea alta la principal fuente fue la porción media del transecto Guascama y en marea baja la bocana del río Sanquianga. La densidad del ictioplancton presentó una estructura espacial agregada cuya fuente principal se ubicó en el transecto de Guascama durante la marea alta coincidiendo en este aspecto con las medidas de diversidad de este mismo ensamble.

La extrapolación de las medidas de diversidad permitió calcular las diferencias entre cada una de las categorías establecida en este estudio, concluyendo que para el ictioplancton si existen diferencias en los tres componentes de riqueza en cada transecto, marea y sector considerado, siendo el transecto de Guascama en marea baja uno de las principales fuentes de diversidad del ictioplancton. Para el fitoplancton, solo la riqueza ( $^0D$ ) presentó variaciones entre los transectos siendo la principal fuente de la bocana del río Sanquianga. En cuanto a la composición de los dos ensambles, la situación es muy similar, ya que la prueba de Escalamiento Multidimensional no detectó agrupamiento en cuanto la composición de los ensambles, concluyendo que el diseño de la toma de las muestras solo pudo capturar la composición de una sola comunidad en estos dos ensambles estudiados.

No se detectó correspondencia entre las medidas de diversidad de los dos ensambles, esto nos indica que estos dos ensambles no son determinantes entre ellos para los procesos de mantenimiento de la riqueza y la diversidad individualmente. Solo se detectó una correspondencia entre la clorofila a y la densidad del ictioplancton en marea baja, pero esta correspondencia es muy débil y no se puede extrapolar una causalidad entre estas dos variables, como para explorar más profundamente la construcción de un modelo explicativo de ambas.

Finalmente, las relaciones entre las métricas de la diversidad consideradas para cada ensamble y las variables fisicoquímicas medidas, solo se encontraron para el fitoplancton. La densidad de células del fitoplancton presentó la mayor incidencia de correlaciones positivas con algunas de las variables a pesar de haber removido los efectos espaciales con la prueba de Mantel. Estas correlaciones detectadas en ausencia de las influencias de la estructura espacial son importantes sobre todo porque son relaciones que se han encontrado en otros estudios (Elmgren & Larsson, 2001; Jacquet et al., 2006) y tienden a explicar sobre todo la biomasa, la clorofila o la densidad de células de este grupo del plancton. Cabe resaltar que estas correlaciones se presentaron sobre todo durante el período de marea baja donde casi la mayoría de los nutrientes, los sólidos suspendidos aumentan su concentración y las aguas con tendencia eutróficas están presentes (Figura 16), lo que podría confirmar que el fitoplancton es mucha mas dependiente de estas condiciones que el ensamble de ictioplancton que puede estar relacionado con otras características que no necesariamente son abióticas.

## 8 Conclusiones

La mayoría de las variables fisicoquímicas estudiadas presentaron unas fuertes estructuras espaciales con efectos fuente muy marcados, sobre todo en los sectores de las bocanas. En estos ambientes costeros la marea baja acentúa estos efectos fuente sobre todo para los nutrientes, los cuales se disuelven durante los períodos de marea alta, debido a la entrada de agua oceánica, y pierden esta estructura espacial.

La diversidad de los ensambles de fitoplancton e ictioplancton no están relacionadas entre si dentro del área y estas fluctúan de manera independiente entre ellas. Las estructuras espaciales positivas indican que estas características de los ensambles no están siendo influenciados directamente por las diferencias entre las mareas sino más bien por las fuentes de nutrientes, sólidos suspendidos y cambios de la temperatura y salinidad en la columna de agua.

Solo el fitoplancton mostró una mayor tendencia a relacionarse de manera positiva con los cambios de la concentración de los nutrientes en general, los sólidos suspendidos y los cambios de temperatura, pero el ictioplancton presentó una mayor independencia de las características hidrográficas del agua y presentó una fuerte estructura espacial agregada sobre todo hacia el



sector de Guascama, lo que explica el patrón de riqueza y densidad encontrados durante este estudio.

## 9 Productos generados

Repositorio de análisis de los datos de este estudio:

[https://github.com/ChrisBermudezR/Ictioplancton\\_ExPacifico2021](https://github.com/ChrisBermudezR/Ictioplancton_ExPacifico2021)

## 10 Literatura citada

- Ali, M., Al-Yamani, F., & Polikarpov, I. (2011). The effect of tidal cycles on the community structure of plankton (with emphasis on copepods) at AFMED Marina in winter (a preliminary study). *Crustaceana*, 84(5-6), 601-621. <https://doi.org/10.1163/001121611X572814>
- Andersen, T., Hessen, D. O., Håll, J. P., Khomich, M., Kyle, M., Lindholm, M., Rasconi, S., Skjelbred, B., Thrane, J., & Walseng, B. (2020). Congruence, but no cascade – Pelagic biodiversity across three trophic levels in Nordic lakes. *Ecology and Evolution*, 10(15), 8153-8165. <https://doi.org/10.1002/ece3.6514>
- Azeria, E. T., Fortin, D., Lemaître, J., Janssen, P., Hébert, C., Darveau, M., & Cumming, S. G. (2009). Fine-scale structure and cross-taxon congruence of bird and beetle assemblages in an old-growth boreal forest mosaic. *Global Ecology and Biogeography*, 18(3), 333-345. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00454.x>
- Beltrán-León, B. S., & Morales Osorio, Y. A. (2021). Distribución, composición y abundancia del ictioplancton en tres áreas marinas protegidas del Pacífico colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(2), 31-52. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.2.1062>
- Benincà, E., Huisman, J., Heerkloss, R., Jöhnk, K. D., Branco, P., Van Nes, E. H., Scheffer, M., & Ellner, S. P. (2008). Chaos in a long-term experiment with a plankton community. *Nature*, 451(7180), 822-825.
- Bivand, R. S., & Wong, D. W. S. (2018). Comparing implementations of global and local indicators of spatial association. *Test (Madr.)*, 27(3), 716-748.
- Borkman, D. G., & Smayda, T. (2009). Multidecadal (1959–1997) changes in Skeletonema abundance and seasonal bloom patterns in Narragansett Bay, Rhode Island, USA. *J. Sea Res.*, 61(1-2), 84-94.
- Cabra-García, J., Bermúdez-Rivas, C., Osorio, A. M., & Chacón, P. (2012). Cross-taxon congruence of  $\alpha$  and  $\beta$  diversity among five leaf litter arthropod groups in Colombia. *Biodiversity and Conservation*, 21(6), 1493-1508. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0259-5>
- Chang, H.-Y., McKown, K., & Chen, Y. (2023). A long-term ichthyoplankton monitoring program suggests climate-induced environmental variabilities changed fish communities in the Hudson River estuary. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1077997. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1077997>
- Chao, A., Gotelli, N. J., Hsieh, T. C., Sander, E. L., Ma, K. H., Colwell, R. K., & Ellison, A. M. (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*, 84(1), 45-67. <https://doi.org/10.1890/13-0133.1>
- Dirisu, A. R. (2019). Plankton diversity and community structure of asarama estuary in the niger delta in relation to physico-chemistry. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(5). [https://doi.org/10.15666/aeer/1705\\_1027710292](https://doi.org/10.15666/aeer/1705_1027710292)
- Dufrene, M., & Legendre, P. (1997). Species Assemblages and Indicator Species: The Need for a Flexible Asymmetrical Approach. *Ecological Monographs*, 67(3), 345. <https://doi.org/10.2307/2963459>
- Egge, J., & Aksnes, D. (1992). Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, 83(2), 281-289.



- Elmgren, R., & Larsson, U. (2001). Nitrogen and the Baltic Sea: Managing nitrogen in relation to phosphorus. *ScientificWorldJournal*, 1 Suppl 2, 371-377.
- Falero-Alama, S., & de María Madrid-Ibarra, F. (2019). Variación espacio-temporal del fitoplancton marino en la plataforma albacora, lote z1, Tumbes, Perú. *Biotempo*, 16(1), 117-133.
- Gualancañay, E., Tapia, M. E., & Naranjo, C. (2003). Composición y variación estacional del fitoplancton, zooplancton y microbentos en el estuario interior del Golfo de Guayaquil, durante el año 2003. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 12(1), 103-128.
- Hargraves, P. E., & Viquez, M. (1985). Spatial and temporal distribution of phytoplankton in the Gulf of Nicoya, Costa Rica. *Bulletin of marine science*, 37(2), 577-585.
- Jacquet, S., Delesalle, B., Torréton, J. P., & Blanchot, J. (2006). Response of phytoplankton communities to increased anthropogenic influences (southwestern lagoon, New Caledonia). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 320, 65-78.
- Lansac-Tôha, F. M., Heino, J., Bini, L. M., Peláez, O., Baumgartner, M. T., Quirino, B. A., Pineda, A., Meira, B. R., Florêncio, F. M., Oliveira, F. R., Bomfim, F. F., Silveira, M. J., Dainez-Filho, M. S., Campos, R., Dias, R. M., Bonecker, C. C., Higuti, J., Mormul, R. P., Benedito, E., ... Velho, L. F. M. (2022). Cross-Taxon Congruence of Taxonomic and Functional Beta-Diversity Facets Across Spatial and Temporal Scales. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 903074. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.903074>
- Legendre, P. (1993). Spatial Autocorrelation: Trouble or New Paradigm? *Ecology*, 74(6), 1659. <https://doi.org/10.2307/1939924>
- Legendre, P., & Troussellier, M. (1988). Aquatic heterotrophic bacteria: Modeling in the presence of spatial autocorrelation: Modeling autocorrelated data. *Limnology and Oceanography*, 33(5), 1055-1067. <https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.5.1055>
- Oksanen, J., Simpson, G. L., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoechs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Carvalho, G., Chirico, M., Caceres, M. D., Durand, S., ... Weedon, J. (2022). *vegan: Community Ecology Package* (version 2.6-2) [R package]. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Pawluk, M., Fujiwara, M., & Martinez-Andrade, F. (2021). Climate effects on fish diversity in the subtropical bays of Texas. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 249(107121), 107121.
- Rajasegar, M. (2003). Physico-chemical characteristics of the Vellar estuary in relation to shrimp farming. *J. Environ. Biol.*, 24(1), 95-101.
- Restrepo A, J. D. (2012). Assessing the effect of sea-level change and human activities on a major delta on the Pacific coast of northern South America: The Patía River. *Geomorphology*, 151-152, 207-223. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.02.004>
- Restrepo Angel, J. D. (2008). *Deltas de Colombia: Mofodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global*. Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Segura, A. M., Kruk, C., Calliari, D., García-Rodriguez, F., Conde, D., Widdicombe, C. E., & Fort, H. (2013). Competition drives clumpy species coexistence in estuarine phytoplankton. *Sci. Rep.*, 3(1), 1037.
- Thiese, M. S., Ronna, B., & Ott, U. (2016). P value interpretations and considerations. *Journal of Thoracic Disease*, 8(9), E928-E931. <https://doi.org/10.21037/jtd.2016.08.16>
- Toranza, C., & Arim, M. (2010). Cross-taxon congruence and environmental conditions. *BMC ecology*, 10, 18. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-10-18>