



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**CARACTERIZACIÓN TERMOHALINA DE LAS
MASAS DE AGUA EN EL GOLFO DE URABÁ.
CASO ESPECÍFICO DESEMBOCADURAS DEL
RÍO LEÓN Y EL RÍO ATRATO**

Autor(es)

Giner Andrey Jiménez Ruiz
Lina Lucero Campillo Cuervo

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Turbo, Colombia
2020



Caracterización termohalina de las masas de agua del gofo de Urabá. Caso específico
desembocadura del río León y el río Atrato

Giner Andrey Jiménez Ruiz
Lina Lucero Campillo Cuervo

Informe de trabajo de grado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Oceanográfico

Asesores

Vladimir G Toro. Ingeniero civil, Ph.D Oceanografía física
Juan Camilo Restrepo. Ingeniero ambiental, Ph.D Ciencias del mar

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental.
Turbo, Colombia
2020.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de alguna u otra manera influyeron en el desarrollo de este proceso.

De manera muy especial a nuestro asesor Vladimir G. Toro por la confianza y paciencia, por permitirnos llevar a cabo este proyecto. Gracias por brindarnos el conocimiento necesario para el progreso de nuestra investigación.

A nuestro co-asesor Juan Camilo Restrepo por sus aportes y sugerencias que permitieron despejar dudas para desarrollar este proyecto.

A nuestros compañeros Ricardo Quintana, Wilmar Mosquera, Manuela Higueta, Juan Guevara y Fabio Castañeda por su tiempo y la voluntad de ayudar con el trabajo en campo; y de igual manera a Valeria Aristizábal, Cristian Hincapié y Geraldín Morelo por su tiempo y apoyo.

A nuestras familias por la confianza y el apoyo incondicional, sin el cual no se habría llevado a cabo toda esta experiencia y por ser el motor que nos impulsó a continuar avanzando.

A todos los profesores que nos acompañaron en este proceso de aprendizaje y de formación para nuestra vida profesional.

A nuestros amigos y compañeros por el apoyo, el acompañamiento y los momentos vividos.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	3
TABLA DE CONTENIDO.....	4
RESUMEN.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS.....	9
1 INTRODUCCIÓN.....	10
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo general.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3 MARCO TEÓRICO.....	13
4 AREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA.....	19
4.1 Área de estudio.....	19
4.2 Variables medidas.....	20
4.3 Campañas de medición.....	21
4.3.1 Campaña Tarena II.....	21
4.3.2 Campaña Tarena III.....	22
5 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	23
5.1 Mareas y Caudales.....	23
5.1.1 Marea.....	23
5.1.2 Caudal.....	24
5.2 Río Atrato.....	25
5.2.1 Salinidad.....	25
5.2.2 Densidad.....	26
5.2.3 Temperatura.....	27
5.2.4 Parámetro de estratificación.....	28
5.2.5 Frecuencia de Brunt-Väisälä.....	30
5.2.6 Ángulo de Turner.....	31
5.3 Río León:.....	32
5.3.1 Salinidad.....	32
5.3.2 Temperatura.....	33
5.3.3 Parámetro de estratificación.....	34
5.3.4 Frecuencia de Brunt-Väisälä.....	35
5.3.5 Ángulo de Turner.....	37
6 CONCLUSIONES.....	39
7 TRABAJO FUTURO.....	40

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....41



RESUMEN

Las desembocaduras de los ríos en el mar son sitios altamente dinámicos en los que se presentan procesos de sedimentación, así como fenómenos de intrusión salina y estratificación termohalina. Las desembocaduras de los ríos Atrato y León son dos sitios que tienen estas características. Con el fin de avanzar en el entendimiento de los procesos deltaicos de estas zonas, se realizaron dos campañas oceanográficas en las dos épocas climáticas (seca y húmeda). Se usó principalmente un CTD, con el cual se midieron variables como conductividad, temperatura y presión en la columna de agua desde la zona oceánica cercana a las desembocaduras de los ríos Atrato y León, y siguiendo en dirección del cauce del río aguas arriba. Se encontró que existe intrusión salina en ambos ríos en época seca y que, por el contrario, en época húmeda, los niveles de los caudales controlan la posición de la cuña salina más allá de las desembocaduras. Las mediciones permitieron encontrar una masa de agua cálida atrapada entre dos masas de agua de menor temperatura. En general, el comportamiento de la columna presentó una alta estratificación, principalmente en la época húmeda. De acuerdo con la frecuencia de Brunt-Väisälä, la columna presentó valores altos de estabilidad en la zona de haloclinas. De otro lado, los valores del ángulo de Turner y la frecuencia de Brunt-Väisälä permitieron identificar una inestabilidad generada por la turbulencia al encontrarse la masa de agua del río León y la masa de agua del golfo.

Palabras Clave: cuña salina, termohalina, intrusión salina, estratificación, golfo de Urabá, río Atrato, río León.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación general de un estuario. Se observan las zonas dominadas por el mar, el río y la zona de mezcla. Tomado de Perillo & Cuadrado (2013).....	14
Figura 2. Esquema general de las zonas de mezcla y su ubicación respecto al río, estuario, pluma y océano. Tomado de Hetland (2005).....	14
Figura 3. Clasificación de un estuario según la mezcla del agua. Tomado de Valle-Levinson (2010).....	15
Figura 4. Ubicación geográfica del área de estudio. Se muestran los cauces de los ríos Atrato (rojo) y León (azul).	19
Figura 5. Dispositivo CTD (naranjado). Se observa la base que lo protege en campo y sirve de lastre.	21
Figura 6. Transectos de medición en la boca El Roto del río Atrato (1) y desembocadura del río León (2) durante época húmeda (círculos rojos) y seca (círculos negros).....	22
Figura 7. Marea del mes de junio del 2018 (línea roja) y marzo del 2019 (línea azul). Estación de guardacostas de Turbo (Quintana & Higuita, 2020). Los recuadros negros corresponden a los días en los cuales se realizaron las mediciones.	23
Figura 8. Marea durante los días de las mediciones. Estación de guardacostas de Turbo (Quintana & Higuita, 2020) Los recuadros negros indican el período durante el cual fueron realizadas las mediciones	24
Figura 9. Promedio mensual multianual de los caudales de los ríos Atrato y León	24
Figura 10. Campos de salinidad vertical del río Atrato: (a) época húmeda y (b) época seca. El recuadro en la figura (b) representa toda la sección de la figura (a).....	26
Figura 11. Campos de densidad vertical del río Atrato: (a) época húmeda y (b) época seca. El recuadro en la figura (b) representa toda la sección de la figura (a).....	27
Figura 12. Temperaturas del río Atrato época húmeda (a) y época seca (b). El recuadro en la figura (b) representa toda la sección de la figura (a).....	28
Figura 13. Parámetros de estratificación (clásico y modificado) para el río Atrato durante la época húmeda (a) y época seca (b).....	29
Figura 14. Frecuencia de Brunt-Väisälä para los transectos en el río Atrato: (a) época húmeda y (b) época seca. El recuadro en la figura (b) representa toda la sección de la figura (a)	30

Figura 15. Ángulo de Turner para los transectos en el río Atrato durante: (a) época húmeda y (b) época seca. El recuadro en la figura (b) representa toda la sección de la figura (a)	31
Figura 16. Valores de salinidad a lo largo del transecto del río León durante las épocas: (a) húmeda y (b) seca.	33
Figura 17. Valores de temperatura a lo largo del transecto del río León para la época: (a) húmeda y (b) seca.	34
Figura 18. Parámetro de estratificación a lo largo del transecto del río León durante la época: (a) húmeda y (b) seca.	35
Figura 19. Frecuencia de Brunt-Väisälä a lo largo del transecto del río León para la época: (a) húmeda y (b) seca	36
Figura 20. Ángulo de Turner a lo largo del transecto del río León para la época: (a) húmeda y (b) seca.	37

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Intervalos de valores del parámetro de estratificación y el estado de la columna de agua asociado.	16
Tabla 2. Intervalos de los valores de frecuencia de Brunt-Väisälä y el estado de la columna de agua asociado	17
Tabla 3. Intervalos de valores del ángulo de Turner y su estado de columna de agua asociado.	18



1 INTRODUCCIÓN

En los deltas, donde se interseca el agua de un río y el mar suceden diferentes tipos de fenómenos hidrodinámicos y fisicoquímicos. Estos fenómenos cambian en el tiempo y definen en gran medida la trayectoria en la que se depositan los sedimentos, la estabilidad de la columna de agua, las condiciones de mezcla e influyen así de forma directa en la estratificación de la masa de agua.

El monitoreo y el estudio de la dinámica de la cuña salina toma relevancia debido a que su dinámica trae consecuencias como cambios en las posiciones de los sedimentos en suspensión y en las trayectorias de las partículas transportadas por el río (Ospino, 2015). Esta dinámica se hace más significativa, ya que modifica la geomorfología del fondo marino y por ende la batimetría cercana al delta, lo cual puede afectar a la navegación marítima.

Aguado (2013), enfocándose particularmente en los estuarios de Chile, propone una forma numérica con la cual se puede determinar la influencia de las condiciones de los deltas sobre la longitud de la cuña salina en los estuarios. Este autor a partir de este análisis teórico encuentra una relación entre el alcance de la pluma del río en el cuerpo de agua salada y la configuración de las masas de agua en dos capas.

De otro lado, Chango & Nacimba (2015), realizaron mediciones en el río Atacames (Esmeralda, Ecuador). Estos autores proponen un plan de monitoreo de la calidad del agua del estuario, con base en los usos que los pobladores le dan al estuario. Los autores usaron el índice del estado trófico como evaluador de la calidad de las aguas, y encontraron que esta es muy baja en la época seca.

En Colombia, Ospino (2015) evaluó el efecto del caudal, la marea y el viento sobre la estructura y la posición de la cuña salina en el río Magdalena. Para esto usó el modelo hidrodinámico tridimensional MOHID, calibrado y validado con datos de temperatura y salinidad de la columna de agua medidos en el 2012 y 2013. Este autor sugiere que el río Magdalena es un estuario estratificado tipo cuña salina, cuya dinámica está dominada principalmente por el caudal, mientras que la marea y el viento pueden condicionar el grado de salinidad especialmente en bajos caudales.

De otro lado, Thomas & Marino (2016) encontraron que en los períodos de precipitaciones bajas y mareas altas la cuña salina tiende a penetrar grandes distancias aguas arriba. Esto permite, que se pueda contaminar los cuerpos de agua dulce y por lo tanto el agua potable, inutilizándola para el uso doméstico e industrial en las poblaciones costeras.

De igual manera, Hernández (2018) por medio de modelación numérica, estudió la hidrodinámica del estuario del río Magdalena, analizando la variabilidad y mezcla de la masa de agua a través del comportamiento espacio-temporal del cálculo del número de Richardson, la anomalía de la energía potencial, el parámetro de estratificación, la flotabilidad, la energía cinética turbulenta y el

esfuerzo cortante en el fondo (parámetros obtenidos del modelo MOHID). Sus resultados muestran que el caudal del río condiciona la penetración de la cuña salina a lo largo de la desembocadura más que cualquier otro agente forzador. Es así que cuando se alcanzan los caudales mínimos históricos, la cuña salina puede penetrar hasta 20 kilómetros aguas arriba.

Localmente, en el golfo de Urabá, Guevara & Velásquez (2018) realizaron mediciones con un CTD en la zona centro del golfo entre junio y julio de 2017. Estos autores definieron el comportamiento térmico y halino de esta zona, y sugieren que el forzador principal de las condiciones de mezcla y estratificación en el golfo es el río Atrato. De igual manera, Calderón (2019), realizó una caracterización de parámetros como la densidad, salinidad y temperatura en la zona central y norte del golfo.

Ambos autores, sugieren que los perfiles de salinidad están modulados por el caudal del río Atrato. Además, evidenciaron una masa de agua cálida atrapada entre dos masas de agua con menor temperatura, planteando como hipótesis que esta masa de agua se debe posiblemente a los fuertes gradientes de temperatura entre el golfo y el mar Caribe.

Finalmente, en la región de Urabá la empresa Aguas de Urabá (filial de Empresas Públicas de Medellín, escogió el río León como la fuente hídrica para los próximos 30 años de la región). Es así como teniendo en cuenta lo mencionado se ejecutará un proyecto que tendrá una bocatoma aguas arriba del delta. En este sentido, y de acuerdo con lo mencionado anteriormente es importante definir el comportamiento de la cuña salina ya que esta podría contaminar las aguas dulces del río.

Por lo tanto, la presente investigación espera avanzar en el entendimiento del comportamiento de la cuña salina en los ríos Atrato y León durante época seca y húmeda. Con este fin se analizará a lo que sucede en términos de estratificación y estabilidad en las desembocaduras de los ríos y la posible modulación del caudal en su comportamiento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto producido por el caudal y la marea en la dinámica de la cuña salina a partir de mediciones de la salinidad, temperatura y presión en las desembocaduras de los ríos Atrato y León, en las dos épocas climáticas.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las conductividad, temperatura y presión en las desembocaduras de los ríos Atrato y León.
- Determinar la estratificación y estabilidad de la columna de agua en la desembocadura de los ríos.
- Definir las condiciones de la estratificación y la mezcla en las desembocaduras de los ríos Atrato y León.

3 MARCO TEÓRICO

Teniendo en cuenta que el estudio se desarrolló dentro del estuario del golfo de Urabá, es importante tener en cuenta que palabra estuario se deriva del vocablo latín *“aestuarium”* y traduce al español como marisma (Bianchi, 2006). Los estuarios son cuerpos de aguas semicerrados en los cuales confluyen dos corrientes, una de agua salada procedente del mar y otra de agua dulce proveniente de un río (Chango & Nacimba, 2015). Perillo (1995) realiza una definición más descriptiva del mismo: *“un estuario es un cuerpo de agua costero semicerrado que se extiende hasta el límite efectivo de la influencia de la marea, dentro del cual el agua salada que ingresa por una o más conexiones libres con el mar abierto, o cualquier otro cuerpo de agua salino, es diluido significativamente con agua dulce derivada del drenaje terrestre”*.

Desde el punto de vista geológico, los estuarios han existido desde hace más de 200 millones de años. Pero tal y cómo se conocen hoy se comenzaron a formar desde el período interglaciario estable, hacia el final del Holoceno por el aumento del nivel del mar (Chango & Nacimba, 2015).

La circulación hidrodinámica dentro de un estuario la mayoría de las veces puede ser compleja. En ella están involucradas variables como las corrientes generadas por la marea, batimetría irregular y valores altos de turbulencia (MacCready & Geyer, 2010). Estas y otras variables producen alteraciones de los gradientes de densidad debido a los procesos difusivos y de mezcla. Montoya (2010) sugiere que la hidrodinámica de la zona costera es el resultado de la interacción de: batimetría, geomorfología del fondo marino, variabilidad de los campos de viento, aporte de agua y sedimento de los ríos. Así como de fenómenos oceanográficos físicos como corrientes, gradientes de densidad, transferencia de temperatura y oleaje.

Por las características antes mencionadas, los estuarios son algunos de los lugares donde se produce la intrusión del agua de mar en el cauce del río. Esta intrusión depende de las características del río (caudal) y del mar (mareas y oleaje). En este intercambio de masas de agua se produce una dinámica que puede modular al estuario, y que configura en la mayoría de las veces una cuña salina dentro del cauce del río y del mismo estuario. La figura 1 muestra las zonas en las cuales tiene mayor influencia el mar y, el río y la zona de mezcla.

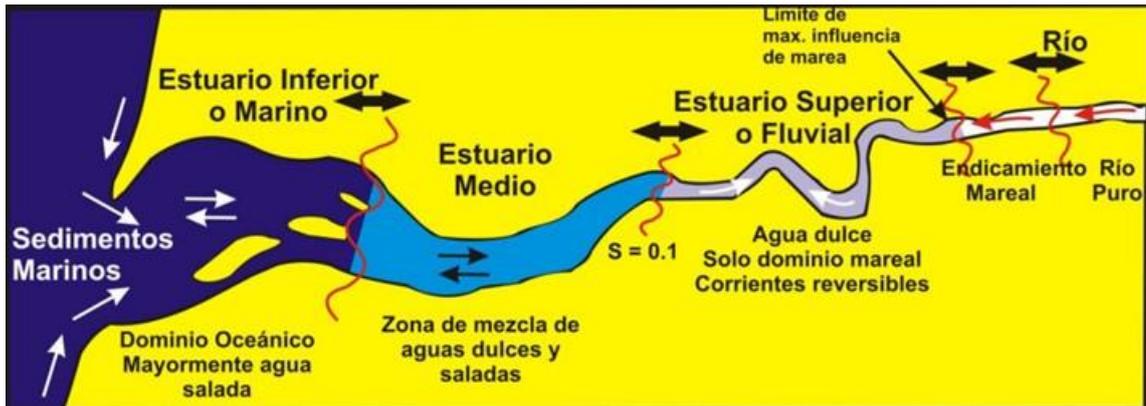


Figura 1. Representación general de un estuario. Se observan las zonas dominadas por el mar, el río y la zona de mezcla. Tomado de Perillo & Cuadrado (2013).

En cuanto a las zonas de mezcla están se definen de acuerdo a la ubicación dentro del estuario. En la parte cercana al delta la mezcla la define el corte de velocidades, mientras que en la zona interna del estuario es el viento quien impone sus condiciones (figura 2).

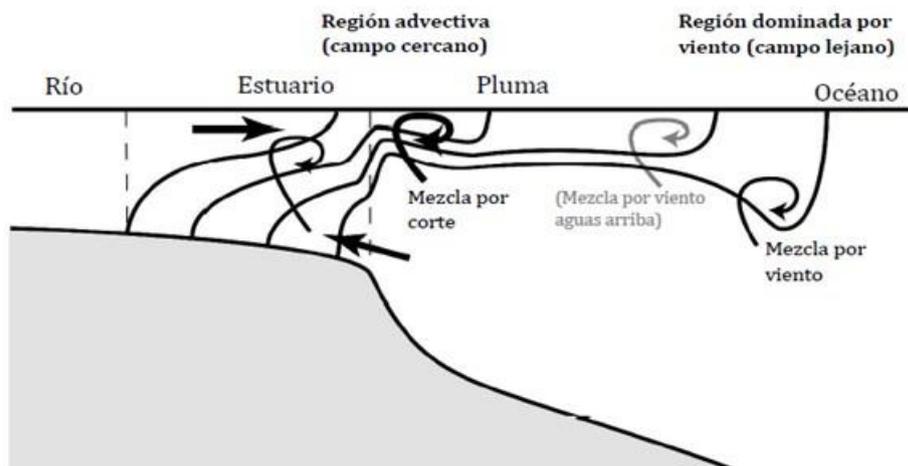


Figura 2. Esquema general de las zonas de mezcla y su ubicación respecto al río, estuario, pluma y océano. Tomado de Hetland (2005).

Los estuarios se pueden clasificar según: la morfología, el intervalo de marea, la salinidad, las características de la mezcla de agua, entre otros. Pirtchard & Cameron (1963) proponen una clasificación de los estuarios en términos de la mezcla de agua y la distribución de la salinidad así:

- **Estuarios tipo cuña salina:** se caracterizan por su alta estratificación, donde el agua dulce fluye por la superficie y el agua del mar penetra por el fondo, con una interfaz bien diferenciada.
- **Estuarios parcialmente mezclados:** el nivel de marea es apreciable, por lo que se produce un intenso intercambio salino en la columna de agua. La

haloclina es difusa, aumentando la influencia de agua dulce hacia el fondo del estuario.

- **Estuarios homogéneos:** el rango de marea es alto y mezcla totalmente la columna de agua, por lo tanto, la haloclina es muy débil. En este tipo de estuarios la salinidad disminuye aguas arriba del río, y por lo tanto el perfil vertical de densidad es constante en toda el área del estuario.

Los estuarios homogéneos o bien mezclados (well mixed) se producen debido a que la razón caudal/mareas es muy baja. Al aumentar el caudal y/o disminuir la marea el estuario puede llegar a ser débilmente (weakly stratified) y/o fuertemente estratificado. En el caso de caudales altos y mareas micromareales el estuario se llama de cuña salina (salt-wedge) (Aguado, 2013). Otro tipo de estuario en el que se combinan altos caudales y niveles de marea bajo es el fuertemente estratificado (strongly stratified) (Figura 3).

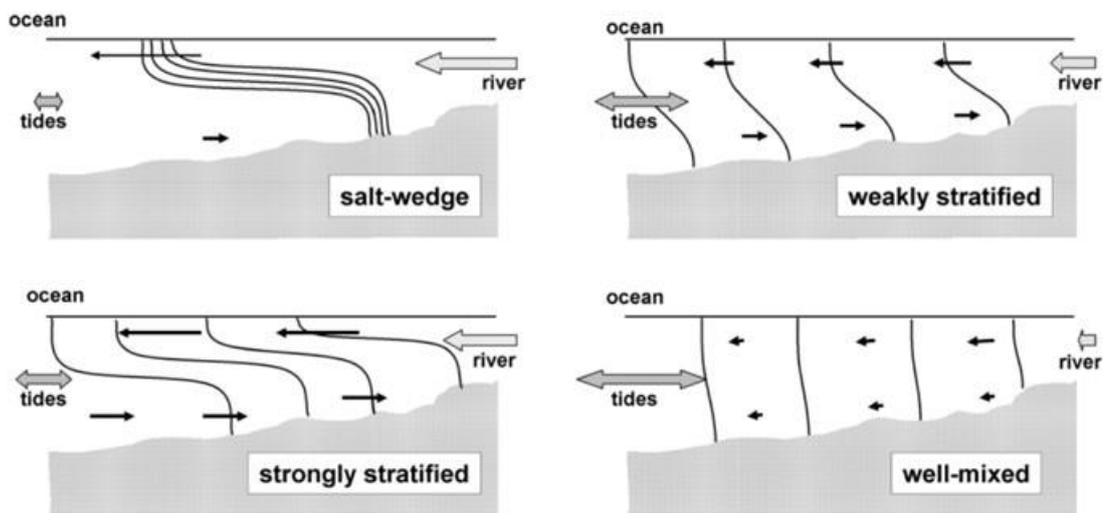


Figura 3. Clasificación de un estuario según la mezcla del agua. Tomado de Valle-Levinson (2010).

La mezcla de las masas de agua que se produce esta modulada por la morfología del cauce del río y la cuenca del mar. Además, por otros agentes dinamizadores como el viento, las corrientes, el oleaje y la marea, encargados de producir turbulencia y mezcla de las dos masas de agua. De acuerdo Fischer (1976), el viento tiene un efecto fundamental en estuarios anchos y poco profundos.

En el caso de la marea, esta tiene un factor importante en la generación de turbulencia en la zona del delta, ya que dependiendo de su rango se producen inestabilidades en la masa de agua debido a la fricción. Estas inestabilidades dependen de las características de la onda de marea (diurna, semidiurna; macromareal, micromareal). Cuando el estuario es de gran extensión (el ancho es mayor que el radio de deformación de Rossby), la relación entre la corriente

de la marea y la fuerza de Coriolis producen una circulación antihoraria/horaria en el hemisferio norte/sur (Montoya, 2010).

Como se ha comentado, la estratificación de un estuario es una característica importante del mismo. Esta se produce cuando fluidos de diferentes densidades producen una masa de agua estable, debido a que las fuerzas que inducen a la mezcla son mínimas. Un estuario se puede caracterizar por medio del parámetro de estratificación denominado clásico (η_{s1}) en el presente estudio (Haralambidou, Sylaios & Tsihrintzis, 2010), mediante la ecuación (1):

$$\eta_{s1} = \frac{\delta S}{S_{m1}} \quad \text{ó} \quad \eta_{s2} = \frac{\delta S}{S_{m2}} \quad (1)$$

Donde:

δS : Diferencia de salinidad entre el fondo y la superficie.

S_{m1} : Salinidad promedio del perfil agua.

Teniendo en cuenta los procesos complejos que se producen en el delta de los ríos, se hicieron análisis preliminares de los valores de estratificación teniendo en cuenta la salinidad promedio del perfil del agua (η_{s1}). Sin embargo, este parámetro mostró picos elevados de estratificación (> 1.0) en zonas someras, sugiriendo que eran sitios estratificados o de cuña salina, lo cual era erróneo. En el presente trabajo se propone el uso del parámetro η_{s2} , (denominado modificado) donde S_{m2} es la salinidad promedio de todo el transecto analizado. En la Tabla 1 se presentan los intervalos de los valores de η_s , y el estado de la columna de agua.

Tabla 1. Intervalos de valores del parámetro de estratificación y el estado de la columna de agua asociado.

Intervalo	Estado de la columna del agua
$\eta_s < 0.1$	Completamente mezclada
$0.1 < \eta_s < 1.0$	Parcialmente mezclada
$\eta_s > 1.0$	Estratificada y la cuña salina debe ser evidente

Otra manera de cuantificar la estratificación y la estabilidad de la columna de agua es mediante la frecuencia de Brunt-Väisälä [N^2] (Cushman & Beckers, 2011). En la ecuación (2) se presenta la expresión para esta frecuencia:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (2)$$

Donde:

N^2 : Frecuencia de Brunt-Väisälä [$\frac{1}{s^2}$].

g : Aceleración de la gravedad. [$\frac{m}{s^2}$]

ρ : Densidad del cuerpo de agua desplazado. [$\frac{Kg}{m^3}$]

$\frac{\partial \rho}{\partial z}$: Cambio de la densidad respecto a la profundidad. [$\frac{Kg}{m^4}$]

En la Tabla 2 se presentan los intervalos de los valores de la frecuencia de Brunt-Väisälä y su equivalencia con el estado de la columna de agua. Esta frecuencia permite determinar si la columna de agua es estable o inestable.

Tabla 2. Intervalos de los valores de frecuencia de Brunt-Väisälä y el estado de la columna de agua asociado.

Condición	Estado de la columna del agua
$N^2 > 0$	Estable
$N^2 < 0$	Inestable

Finalmente, el ángulo de Turner es otro parámetro que fue utilizado para evaluar la estabilidad estática de una parcela de agua. Este parámetro tiene en cuenta los cambios de flotabilidad potenciales asociados con los procesos de mezcla de doble difusión (Ruddick, 1983). Para el cálculo del ángulo de Turner, se empleó la ecuación de TEOS-10 descrita en la ecuación (3).

$$Tu = \tan^{-1}(\alpha \partial_z T - \beta \partial_z S, \alpha \partial_z T + \beta \partial_z S) \quad (3)$$

Donde:

Tu : Ángulo de Turner en grados de rotación (grados sexagesimales).

α : Coeficiente de expansión térmica. [$\frac{m}{^\circ C}$]

β : Coeficiente de contracción salina. [m]

$\partial_z T$: Variación de la temperatura con respecto a la profundidad. [$\frac{^\circ C}{m}$]

$\partial_z S$: Variación de la salinidad con respecto a la profundidad. [$\frac{1}{m}$]

En la Tabla 3, se presentan los intervalos de los valores del ángulo de Turner y sus estados de la columna de agua asociados. Este ángulo permite definir si la masa de agua es estable o inestable, estáticamente o debido a convección o difusión.

Tabla 3. Intervalos de valores del ángulo de Turner y su estado de columna de agua asociado.

Condición	Estado de la columna del agua
$-45^\circ < Tu < 45^\circ$	Estáticamente estable
$45^\circ < Tu < 90^\circ$	Inestable a la digitación de la sal (Dedos de sal)
$90^\circ < Tu < -90^\circ$	Estáticamente inestable
$-90^\circ < Tu < -45^\circ$	Inestable a la convección difusiva

La inestabilidad a la digitación de sal, o llamada también dedos de sal, es una forma de convección de doble difusión y ocurre cuando una masa de agua de más temperatura y mayor densidad se superpone a una masa de agua de menor densidad y de menor temperatura. Una parcela de agua dulce que se mueve hacia arriba ganará calor más rápido que sal y, por lo tanto, se volverá más ligera que el agua circundante. Se elevará inestablemente como resultado. Se ha observado la digitación de sal en el Mar Caribe, donde da lugar a capas estables de cientos de kilómetros de extensión. El proceso transporta la sal de manera mucho más eficiente que el calor.

La inestabilidad estática es también conocida como “inestabilidad de Rayleigh-Taylor”. Para la interpretación de ésta, se considera la existencia de dos fluidos inmiscibles encerrados en un recipiente. La inestabilidad de Rayleigh-Taylor sucede cuando el fluido de menos densidad empuja al de mayor densidad debido a una perturbación y se rompe el equilibrio entre los fluidos, generando que el fluido más denso se mueva a través del menos denso.

Finalmente, la inestabilidad por convección difusa es una forma de convección de doble difusión y ocurre cuando el agua menos densa y de menor temperatura cubre agua más densa y de mayor temperatura. Si una porción de agua tibia y salada se mueve hacia arriba en la columna de agua, pierde calor más rápidamente de lo que pierde sal, volviéndose más fría y salada, y por lo tanto más densa que sus alrededores, o que el agua en su posición inicial. Luego se hunde más allá de su posición inicial en agua que es más salada pero más cálida. Luego gana calor de esta agua y comienza a elevarse más allá de su posición inicial. La convección difusiva transporta el calor de manera más eficiente que la sal y se cree que es responsable de las estructuras en forma de escalera observadas en la termoclina ártica.

AREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El Golfo de Urabá está localizado en la esquina noroccidental del Caribe colombiano cerca de la frontera con Panamá (ver figura 4). Este cuerpo de agua semicerrado tiene un ancho que varía entre 15 kilómetros (en el centro) y 40 kilómetros (en el norte) y una longitud (sur-norte) aproximada de 80 kilómetros. El golfo tiene profundidades promedio de 30 metros y valores máximos de hasta 70 metros en la parte externa (Velásquez, 2011).

En el Golfo de Urabá desembocan numerosos ríos, entre los que se destacan río Atrato, León, Turbo, Caimán Viejo, Caimán Nuevo y Currulao (Restrepo & Correa, 2002). En este trabajo se tendrán en cuenta el río Atrato y el río León, ya que sus caudales representan la principal contribución de agua dulce al estuario (figura 4).

El río Atrato tiene un caudal total medio es de $2740 \text{ m}^3/\text{s}$ y su descarga total de sedimentos es de $11.26 \times 10^6 \text{ ton/año}$ (Restrepo & Kjerfve, 2004). Esta descarga se divide en cinco brazos principales (de norte a sur): Boca Tarena, Boca El Roto, Boca Matuntugo, Bocas del Atrato y Boca Pichindí (Leoncito). De acuerdo con Restrepo & Correa (2002), por la Boca El Roto sale hasta el 50% del caudal total del río.

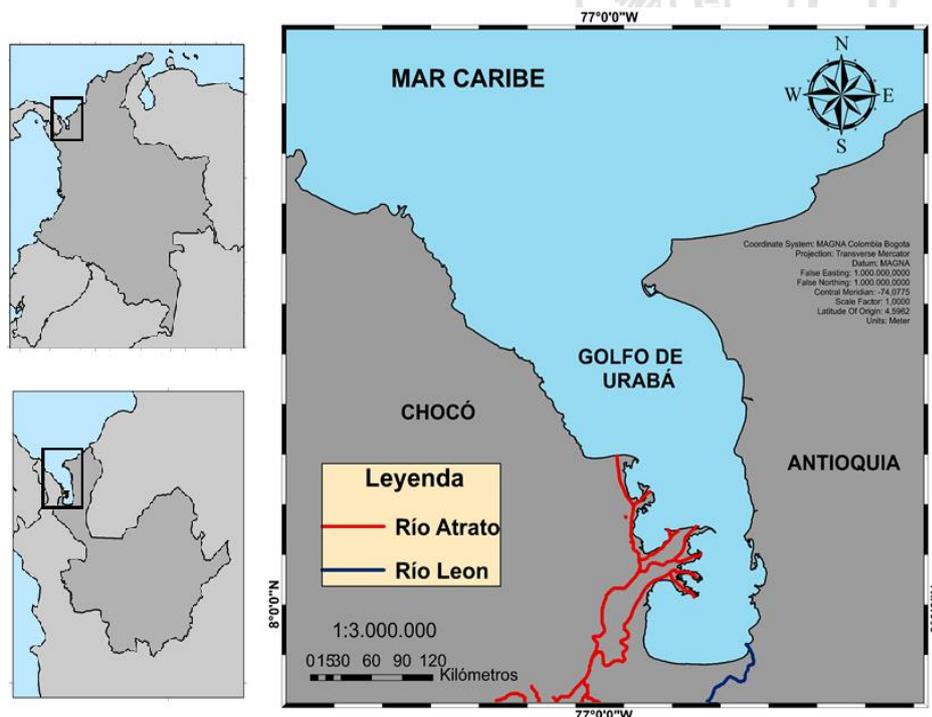


Figura 4. Ubicación geográfica del área de estudio. Cauces de los ríos Atrato (rojo) y León (azul).

Por otro lado, al sureste del golfo está ubicado el río León, el cual sirve de canal para la navegación para los productores de banano hasta el embarcadero Zungo. Este río tiene un caudal promedio de 72 m³/s y una descarga promedio de sedimentos de 2.2 Kton/día (Guzmán & Ceballos, 2001).

En términos de condiciones climáticas y atmosféricas, la zona del golfo de Urabá se caracteriza por una pluviosidad de 2500 mm/año y una temperatura promedio de 28°C. Esta zona presenta dos temporadas climáticas, la época seca que se extiende desde el mes de diciembre hasta abril, con precipitaciones de 70 -100 mm/mes, con predominancia de los vientos alisios de alta intensidad (8 m/s) provenientes del norte y del noreste. Y la época húmeda entre mayo y noviembre, con precipitaciones que superan los 200 mm/mes (Guzmán & Ceballos, 2001), y magnitudes del viento inferiores a 3 m/s con direcciones irregulares, pero principalmente del sur (Universidad de Antioquia, 1997).

En cuanto condiciones oceanográficas, el oleaje proviene principalmente del norte y noreste en la época seca, con alturas promedio de 1.0 metros y períodos predominantes de 7 segundos. En el caso de la marea, esta tiene un régimen micromareal con una frecuencia semidiurna mixta (García *et al.*, 2011), con una amplitud que generalmente no supera los 50 centímetros (Chevillot *et al.*, 1993).

Las variaciones del campo de salinidad en las aguas del golfo de Urabá se ven influenciadas directamente por las épocas climáticas. De acuerdo con Chevillot *et al.* (1993), los mayores valores de salinidad se presentan en la época húmeda debido a que los vientos débiles provenientes del sur ayudan a evacuar las aguas hacia afuera del golfo. Por el contrario, en la época seca los vientos provenientes del noreste producen una mezcla intensa en las capas superiores lo que permite la disminución en esa parte del perfil (Calderón, 2019).

3.2 Variables medidas

En las mediciones se utilizó un CTD tipo Cast-Away ®. El cual cuenta con sensores para monitorear las condiciones de las masas de agua midiendo variables como la conductividad, temperatura y presión.

La conductividad es la habilidad de una solución para conducir corriente eléctrica a través de pequeñas partículas llamadas iones. Cuanto mayor sea la cantidad de estos iones en la solución, mayor será su conductividad. Para medir la conductividad, el Cast-Away ® utiliza dos electrodos que miden la corriente que pasa a través de ellos. A partir de los datos de conductividad es posible obtener los valores de salinidad.

La salinidad es una medida de la cantidad de sales minerales disueltas en el agua. Las sales disueltas se descomponen en iones cargados positiva y negativamente. La salinidad en el golfo de Urabá oscila entre 0.8 y 35, ya que se encuentran aguas dulces provenientes de los ríos (<18) y aguas marinas provenientes del mar Caribe (entre 18 y 35) (Thomas *et al.*, 2007).

En el caso de la temperatura, esta refleja la cantidad de energía calórica almacenada en las masas de agua del mar. Generalmente la temperatura superficial promedio del golfo de Urabá es 28°C. Las descargas de aguas más frías (26°C) son aportadas principalmente por los ríos Atrato (boca el Roto) y León (Thomas *et al.*, 2007). Para medir la temperatura el Cast-Away® tiene dos termistores que permiten medir la temperatura del agua con una precisión de $\pm 0.05^\circ\text{C}$.

Por último, la densidad del agua de mar depende de la temperatura (T), salinidad (S) y presión (P). Para el cálculo de esta variable se utilizó la ecuación del estado del agua de mar y de manera específica el Cast-Away® utilizó la función TEOS-10 (Thermodynamic Equation of Seawater–2010).

3.3 Campañas de medición

Se realizaron dos campañas oceanográficas durante las dos épocas climáticas en junio/2018 y abril/2019. Estas campañas fueron llamadas Tarena II y Tarena III, obteniendo mediciones de variables estuarinas como conductividad, temperatura y salinidad en la desembocadura del río León y en la boca El Roto del río Atrato.

3.3.1 Campaña Tarena II

La primera campaña de medición fue realizada el 1 de junio del año 2018, en condiciones típicas de la época húmeda. Durante la campaña se hicieron lances de CTD siguiendo un transecto desde la parte interna del golfo en sentido aguas arriba de los cauces principales de los ríos Atrato (Boca El Roto) y León.

En la figura 6 se observa el recorrido con puntos de color rojo. Las mediciones se realizaron hasta que las mediciones del dispositivo CTD indicaban la ausencia de la masa de agua salobre en el fondo. En total se realizaron seis lances en la boca El Roto y 20 mediciones en el río León.

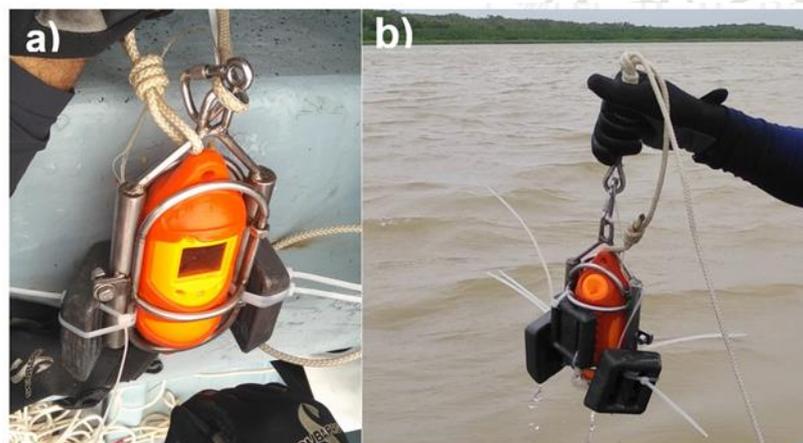


Figura 5. Dispositivo CTD (naranjado). Se observa la base que lo protege en campo y sirve de lastre.

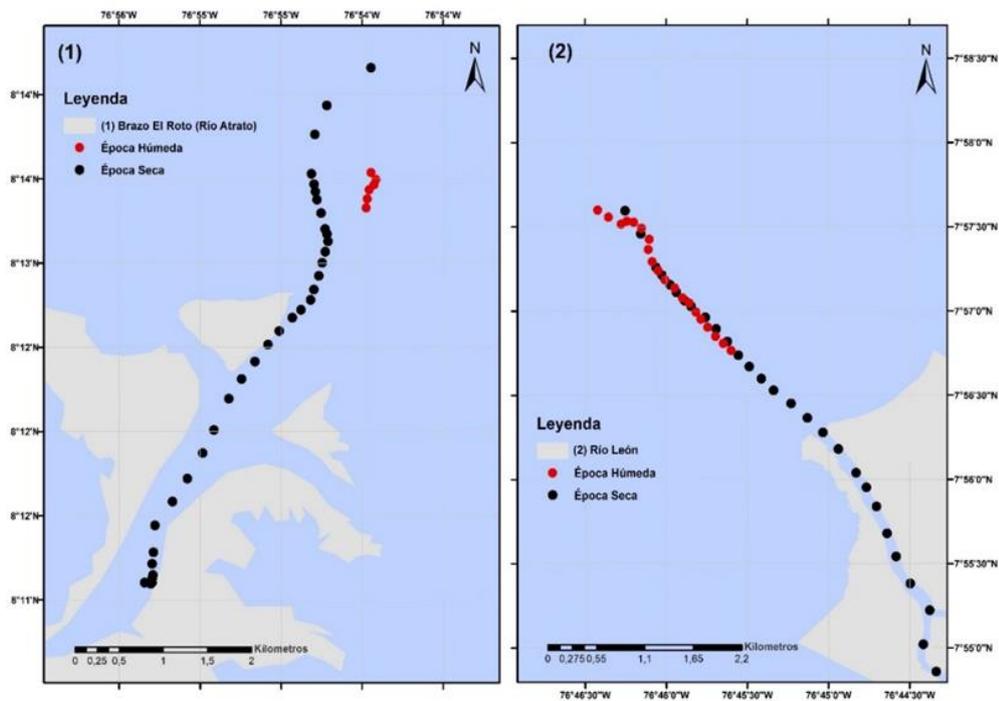


Figura 6. Transectos de medición en la boca El Roto del río Atrato (1) y desembocadura del río León (2) durante época húmeda (círculos rojos) y seca (círculos negros)

3.3.2 Campaña Tarena III

La campaña Tarena III se realizó el día 29 de abril del 2019, en condiciones meteorológicas de la temporada seca. Al igual que en la campaña Tarena II, se realizaron lances de CTD aguas arriba de las desembocaduras de El Roto y río León siguiendo su cauce principal.

La ubicación de los lances realizados en esta campaña puede verse en la figura 6 marcada con puntos negros. Se realizaron un total de 35 mediciones en la boca “El Roto” del río Atrato y 28 en la desembocadura del río León.

Los datos obtenidos en cada una de las campañas fueron procesados en el lenguaje de programación MATLAB. Se realizaron gráficas de contornos con cada una de las variables medidas: Salinidad, temperatura y densidad. Así como de los parámetros de estratificación, frecuencia de Brunt-Väisälä y ángulo de Turner (es de notar que el cálculo del Ángulo de Turner se realizó con la metodología TEOS-10). De esta manera se caracterizaron las masas de agua en las desembocaduras de los ríos Atrato y León.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Mareas y Caudales

4.1.1 Marea

El rango de marea puede ser significativo en los procesos de mezcla de la columna de agua y en la dinámica de la cuña salina en los cauces de los ríos. En la región el rango de marea es micromareal (aproximadamente ± 40 centímetros), de antemano se asume que es un forzador cuya modulación sobre los procesos mencionados, podría ser poco significativo. En la figura 7 se observan los niveles de marea de la estación guardacostas de Turbo durante el mes en el que se realizaron las campañas Tarena II y III.

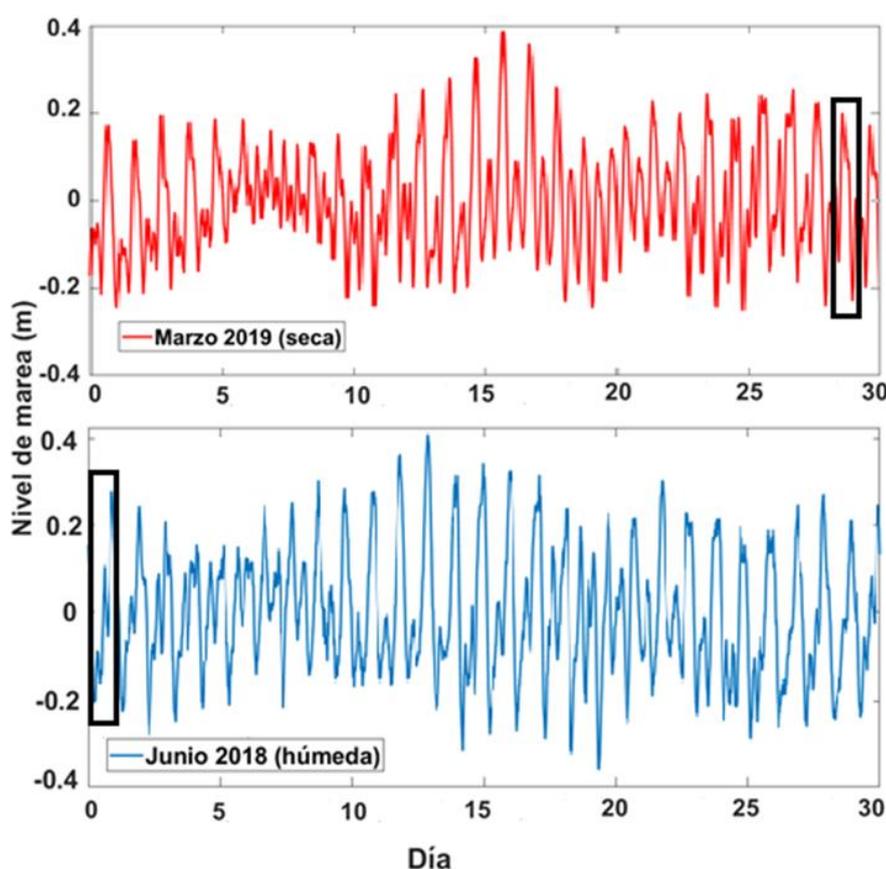


Figura 7. Marea del mes de junio del 2018 (línea roja) y marzo del 2019 (línea azul). Estación de guardacostas de Turbo (Quintana & Higueta, 2020). Los recuadros negros corresponden a los días en los cuales se realizaron las mediciones.

En la figura 8 se presenta el estado de la marea en los días de muestreo (recuadros negros, figura 7). En el caso de la época húmeda (línea azul) se realizaron las mediciones en el río Atrato alrededor de la marea alta menos energética. Seguidamente, se midieron las variables en el río León durante la llenante de la marea más energética. Para la época seca (línea roja), las mediciones en el río Atrato se realizaron alrededor de la marea baja. Luego,

durante las mediciones en el río León se realizaron durante la marea alta más energética.

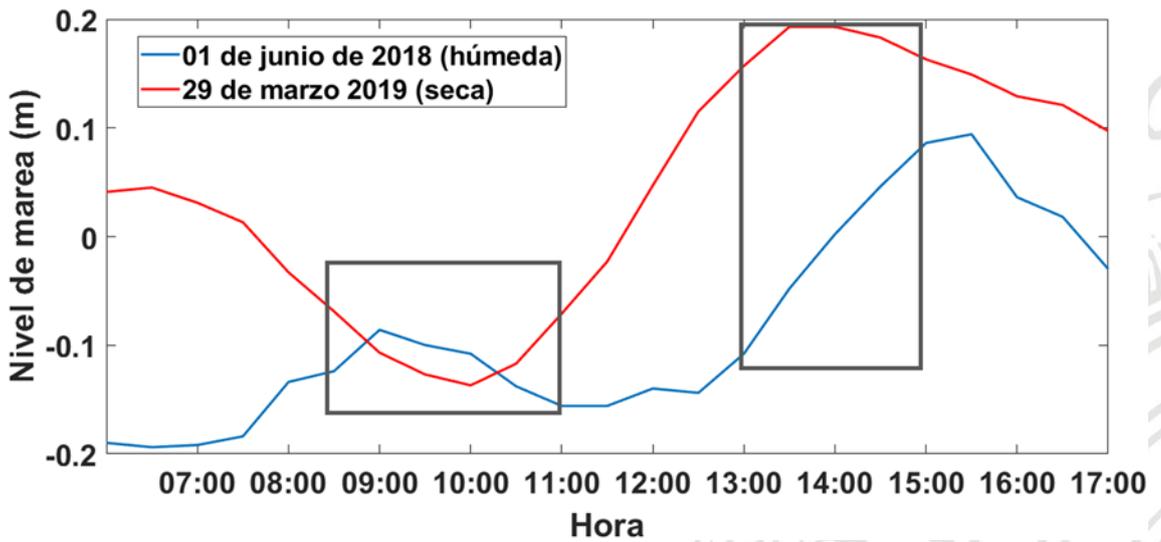


Figura 8. Marea durante los días de las mediciones. Estación de guardacostas de Turbo (Quintana & Higuita, 2020) Los recuadros negros indican el período durante el cual fueron realizadas las mediciones

4.1.2 Caudal

Las cuencas de los ríos León y Atrato se encuentran muy cercanas entre sí, por lo que la época húmeda y la época seca afectan de igual manera los niveles de los ríos. De acuerdo con los promedios mensuales multianuales de la estación Bellavista del IDEAM (figura 9) y mediciones realizadas por funcionarios de Aguas Regionales de Urabá, los caudales máximos se presentan en los meses de época húmeda (mayo a noviembre) y los mínimos caudales en la época seca.

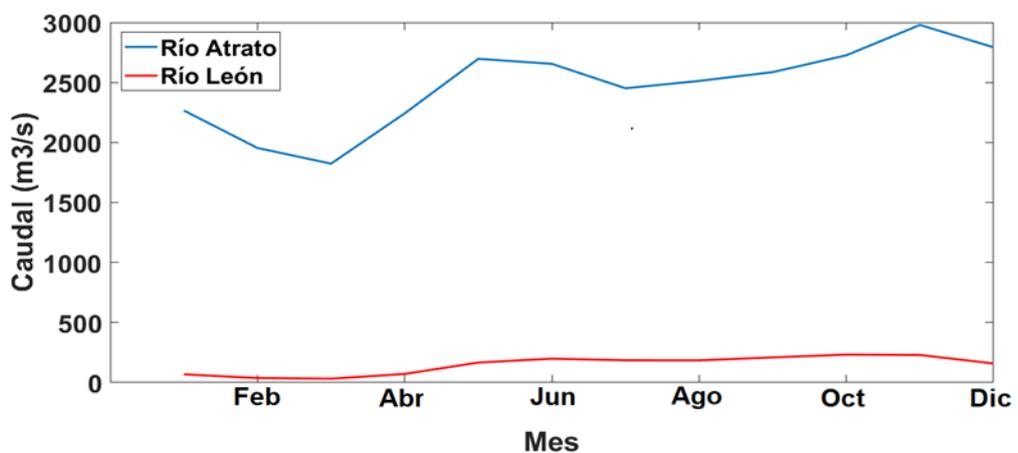


Figura 9. Promedio mensual multianual de los caudales de los ríos Atrato y León

A continuación, se presentan las gráficas de salinidad, temperatura y densidad a lo largo de cada uno de los transectos. Así como los análisis de la estabilidad y estratificación de las masas de agua.

4.2 Río Atrato

4.2.1 Salinidad

En la figura 10.a (época húmeda) se observa como la masa de agua superficial con salinidad baja de 0 a 5, se encontraba sobre las masas de agua de alta salinidad, siendo notoria la alta estratificación de la columna de agua. Se registraron masas de aguas con salinidades entre 21 y 28 (entre 2 y 7 metros de profundidad). Estos valores de salinidad sugieren que en estas profundidades se encontraba la haloclina.

Finalmente, se presentó una masa de agua con salinidades entre 30 y 35 de origen marino (entre los 8 y 14 metros de profundidad). Los valores indican que la masa de agua salada no ingresó al cauce del río, proponiendo que el caudal del río controla el avance de la cuña salina.

En época seca (figura 10.b), se obtuvo una mayor área de medición sobre la desembocadura del río Atrato. En este caso, el área fue mayor debido a que, en el momento de la toma de datos, el instrumento registró valores de alta salinidad aguas arriba. Al inicio del transecto (izquierda) en los primeros 10 metros de profundidad se encontró una masa de agua homogénea desde superficie hasta profundidad con una salinidad de 23 que se extendió hasta 2000 metros. Los valores de salinidad y la ubicación de la haloclina fue debida en parte a la mezcla intensa producida por los vientos Alisios de esta época.

Esta masa se avanzó hasta 2200 metros y se encontró con una masa de agua de baja salinidad en superficie (0 a 5) proveniente del río. Esto obligó a la masa de agua salada a hundirse por diferencia de densidad entre 4 y 8 metros de profundidad. Esta masa de agua salobre logró incursionar al cauce del río, hasta los 6000 metros lineales, según la gráfica.

En la época seca los bajos caudales del río Atrato y los valores bajos de la marea permitieron una intrusión salina más efectiva sobre el cauce del río. Esto concuerda con lo expuesto por Aguado (2013), quien sugirió que, al incorporar el efecto de la marea sobre el sistema, se obtiene como resultado que la intrusión salina varía su alcance aguas arriba del río en el tiempo. Esto se comprobó ya que, a aproximadamente a los 2200 metros, se presentó una zona de baja energía que genera una depositación de sedimentos, dando como resultado una barra frontal evidenciada en la batimetría del lugar.

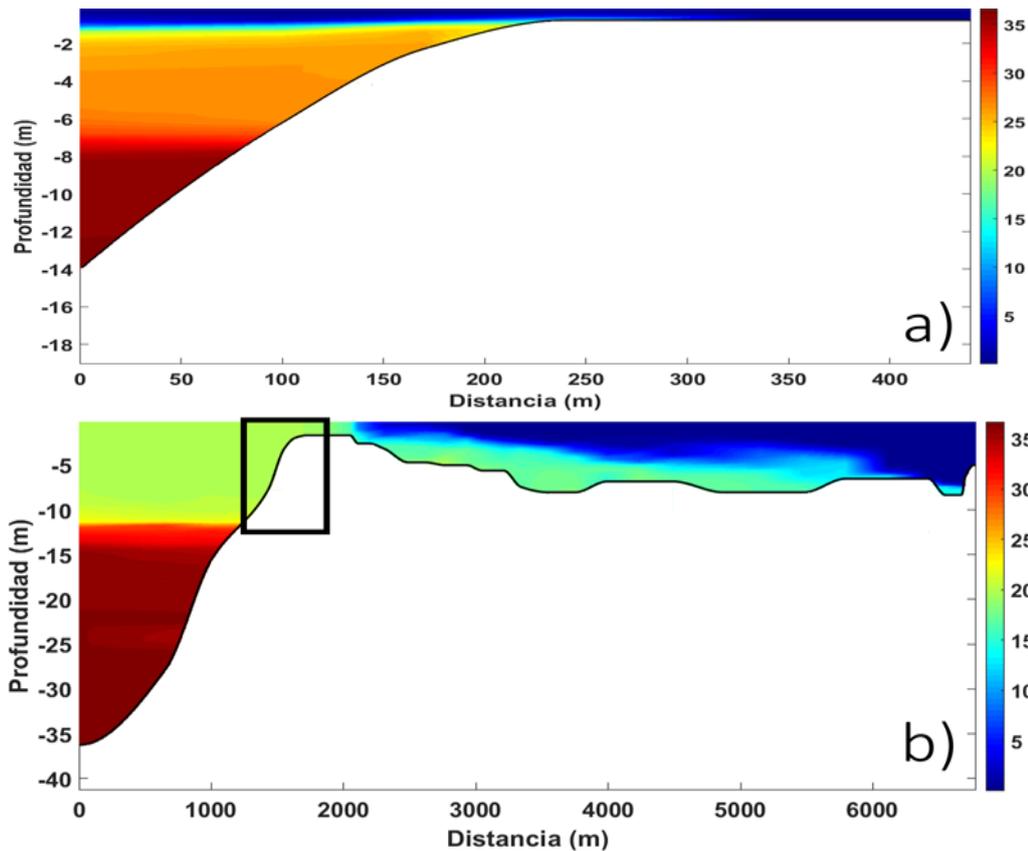


Figura 10. Campos de salinidad vertical del río Atrato: (a) época húmeda y (b) época seca. El recuadro en la figura (b) representa toda la sección de la figura (a)

Estos resultados concuerdan con lo descrito por Ospino (2015) encontró que la máxima penetración de la cuña salina se dio en condiciones de mínimo caudal. En esta investigación, el comportamiento fue similar debido a que en época seca el caudal del río Atrato, según el promedio anual, es bajo ($1800 \text{ m}^3/\text{s}$), permitiendo la intrusión de aguas saladas hacia el cauce del río. A esto se le suma que la batimetría en el cauce del río es somera comparada con las zonas oceánicas cercanas.

De otro lado, en la figura 10.a se presentó una salida notable de las aguas del río sobre las aguas saladas de origen marino. Esto se debió a que, en esta época, se registraron los valores de caudal más altos del año ($2600 \text{ m}^3/\text{s}$), por lo tanto, la energía del caudal de río Atrato es mayor que la de la intrusión salina.

4.2.2 Densidad

En la figura 11 se presentan los campos verticales de densidad del río Atrato durante ambas épocas climáticas. Nuevamente se presenta un recuadro negro en la Figura 11b que corresponde en toda la extensión a la Figura 11a.

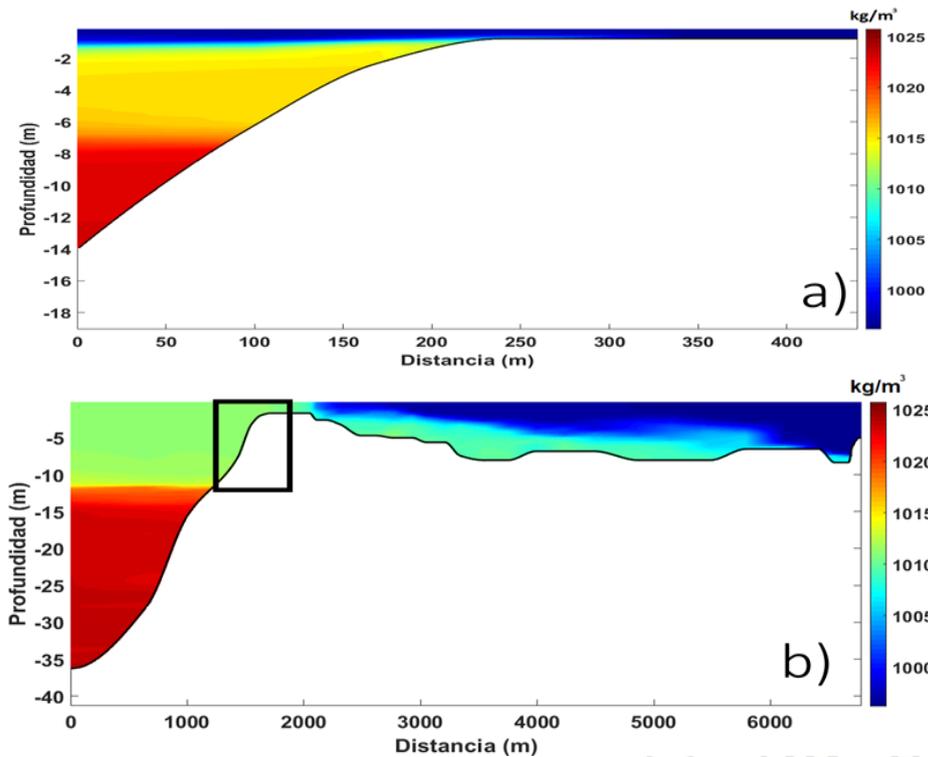


Figura 11. Campos de densidad vertical del río Atrato: (a) época húmeda y (b) época seca. El recuadro en la figura (b) representa toda la sección de la figura (a)

Los resultados mostrados en la Figura 11 sugieren la evidente relación entre la salinidad y la densidad del Golfo, por lo que el análisis de este parámetro no se realiza en esta sección, ni tampoco para el río León. A continuación, se presentan los campos de temperatura.

4.2.3 Temperatura

En la figura 12 se presenta el comportamiento de la temperatura en profundidad a lo largo de los transectos realizados en el río Atrato durante la época húmeda y en la época seca. En la figura 12.a se presentan tres masas de agua bien diferenciadas por su temperatura. Entre la superficie y 1 metro de profundidad, se obtuvieron los valores de temperatura más bajos (27 – 27.5°C aproximadamente). A los dos metros de profundidad, se registró una masa de agua, más cálida (30°C) hasta los 8 metros. Finalmente, entre los 8 y los 14 metros, se reconoció una tercera masa de agua, de menor temperatura (28.9 - 29.2°C) que la anterior.

La masa de agua más cálida que está en la mitad de los perfiles, se encuentra atrapada entre dos masas de agua de menor temperatura. Físicamente, en una columna de agua estratificada, las masas de agua de mayor temperatura se encuentran en superficie, y las de menor temperatura están en el fondo.

De acuerdo con Guevara & Velázquez (2018) y Calderón (2019) la masa de agua atrapada puede explicarse debido a la subducción de masas de agua saladas y con altas temperaturas sobre masas de agua dulce al entrar al golfo

de Urabá. Al tener una masa de agua cálida por debajo de una fría y más densa genera inestabilidades, las cuales fueron evidenciadas por el ángulo de Turner.

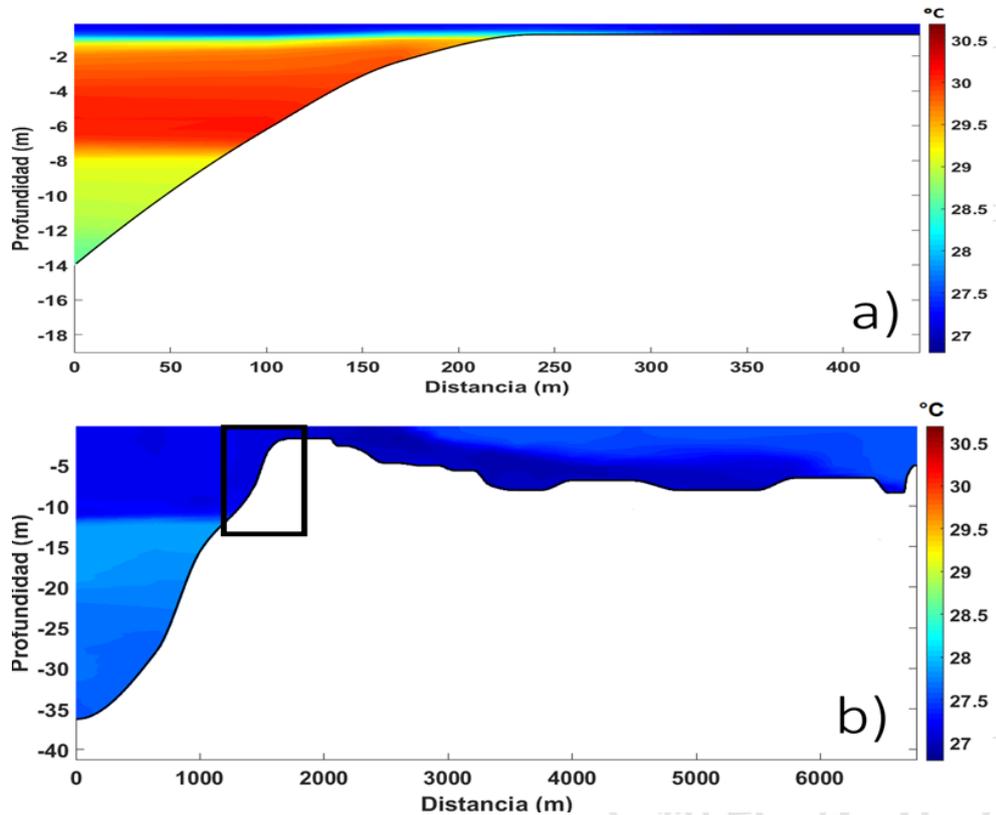


Figura 12. Temperaturas del río Atrato época húmeda (a) y época seca (b). El recuadro en la figura (b) representa toda la sección de la figura (a).

De otro lado, en la figura 12.b (época seca), se registra cómo la temperatura es bastante homogénea. Sin embargo, si se observa detalladamente la masa de agua cálida atrapada apareció nuevamente. Es de notar que el intervalo de temperaturas fue de hasta 4°C (27 a 31°C).

4.2.4 Parámetro de estratificación

En la figura 13.a se presentan los valores de los parámetros de estratificación (clásico y modificado, ecuación 1). En los primeros 170 metros lineales, se registró claramente la presencia de cuña salina ya que ambos parámetros tuvieron valores superiores a 1.0. Entre los 170 y 290 metros, el parámetro de estratificación clásico (línea azul) mostró valores superiores a 1.0 sugiriendo una columna de agua estratificada que no se evidenció en los resultados de la figura 11.a mientras que el parámetro de estratificación modificado (línea roja) muestra valores; entre 0.1 y 1.0 lo que propone que la columna de agua estaba parcialmente mezclada. Este resultado coincide con lo evidenciado en la figura 11.a. Luego, ambos parámetros tomaron valores entre 0.1 y 1.0 entre los 290 y 340 metros a partir de los cuales, hasta el final del transecto los parámetros presentaron valores inferiores a 0.1 señalando una masa de agua homogénea.

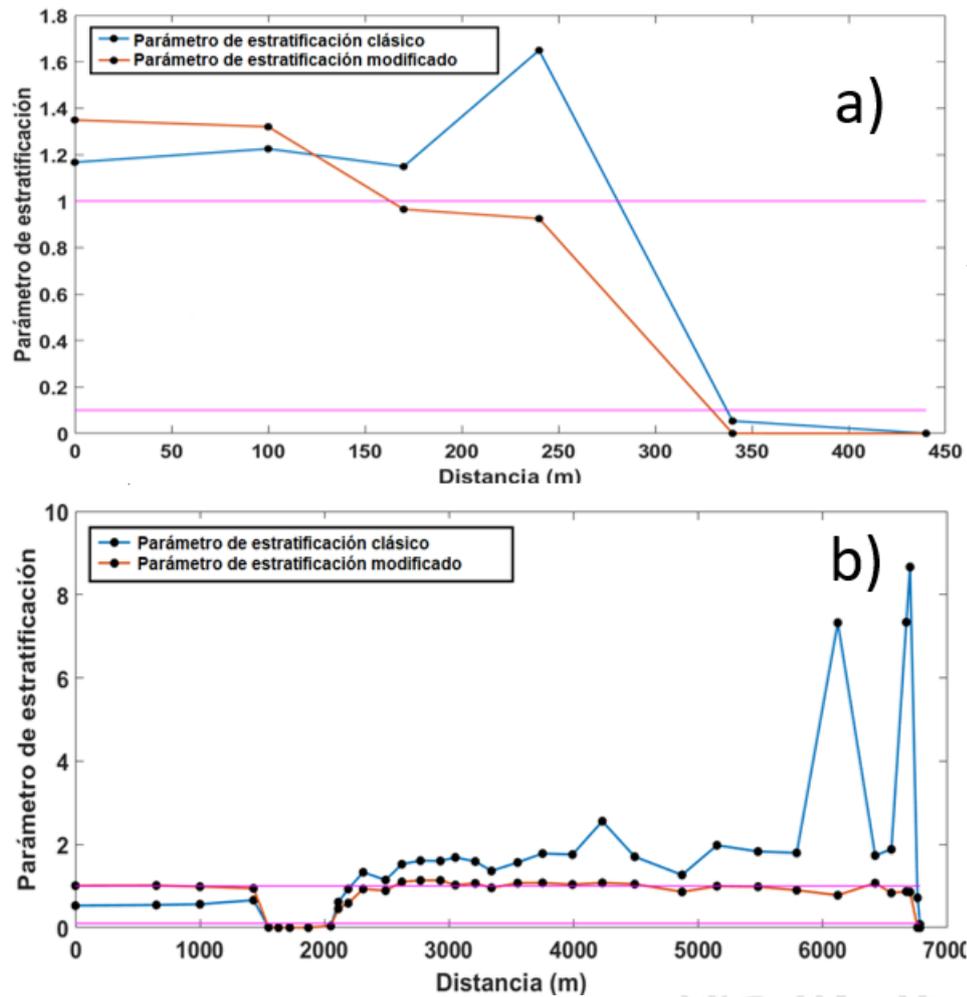


Figura 13. Parámetros de estratificación (clásico y modificado) para el río Atrato durante la época húmeda (a) y época seca (b)

Para la época seca (figura 13.b), durante los primeros 1500 metros, el parámetro clásico registró valores entre 0.1 y 1.0 lo cual propone que la columna de agua se encontraba parcialmente mezclada. De otro lado, el parámetro modificado presentó valores cercanos a 1.0, lo que sugiere que la columna de agua se encontraba estratificada y por ende la presencia de la cuña salina. Entre los 1500 y 2000 metros, el comportamiento fue similar para ambos parámetros con valores inferiores a 0.1, lo que sugiere que la columna de agua se encontraba mezclada. A partir de los 2300 metros hasta el final del transecto ambos parámetros evidenciaron valores cercanos o mayores que 1.0 lo que sugiere que existen dos masas de agua bien diferenciadas y por supuesto, la presencia de cuña salina.

En general, los resultados expresados por el parámetro clásico presentaron picos altos que no coincidían totalmente con el comportamiento físico de las masas de agua en el transecto. Mientras que los resultados con el parámetro modificado estaban mejor correlacionados con el comportamiento de éstas.

4.2.5 Frecuencia de Brunt-Väisälä

En la figura 14 se presentan los valores verticales de la frecuencia de Brunt-Väisälä para el río Atrato en época húmeda y seca. Durante la época húmeda, (figura 14.a) los mayores valores (entre 0.25 y 0.4 Hz^2) se registraron aproximadamente entre 1.0 y 2.5 metros de profundidad, lo cual sugiere estabilidad es esa parte de la columna de agua. De acuerdo con los resultados anteriores, la haloclina se presentó debajo de esta última profundidad (ver figura 11.a). Adicionalmente, a los 7 metros se presentaron valores de 0.04 Hz^2 . En general el comportamiento de la columna de agua fue estable puesto que la frecuencia de Brunt-Väisälä tomó valores superiores o cercanos a 0.

En la figura 14.b los valores más altos fueron cercanos a 0.1 Hz^2 a 11 metros de profundidad y en los primeros 1000 metros lineales de transecto. Estos valores se volvieron a presentar a partir de los 2500 metros lineales del transecto a una profundidad que varía hasta el final. Es de notar que, los valores más altos se presentaron en las interfaces de cambio de salinidad, es decir, nuevamente en las haloclinas. En general, la columna de agua registró valores de frecuencia de Brunt-Väisälä superiores o cercanos a 0, es decir, valores que representan estabilidad. Este comportamiento lo evidenció también Hernández (2018) en el delta del río Magdalena durante esta época.

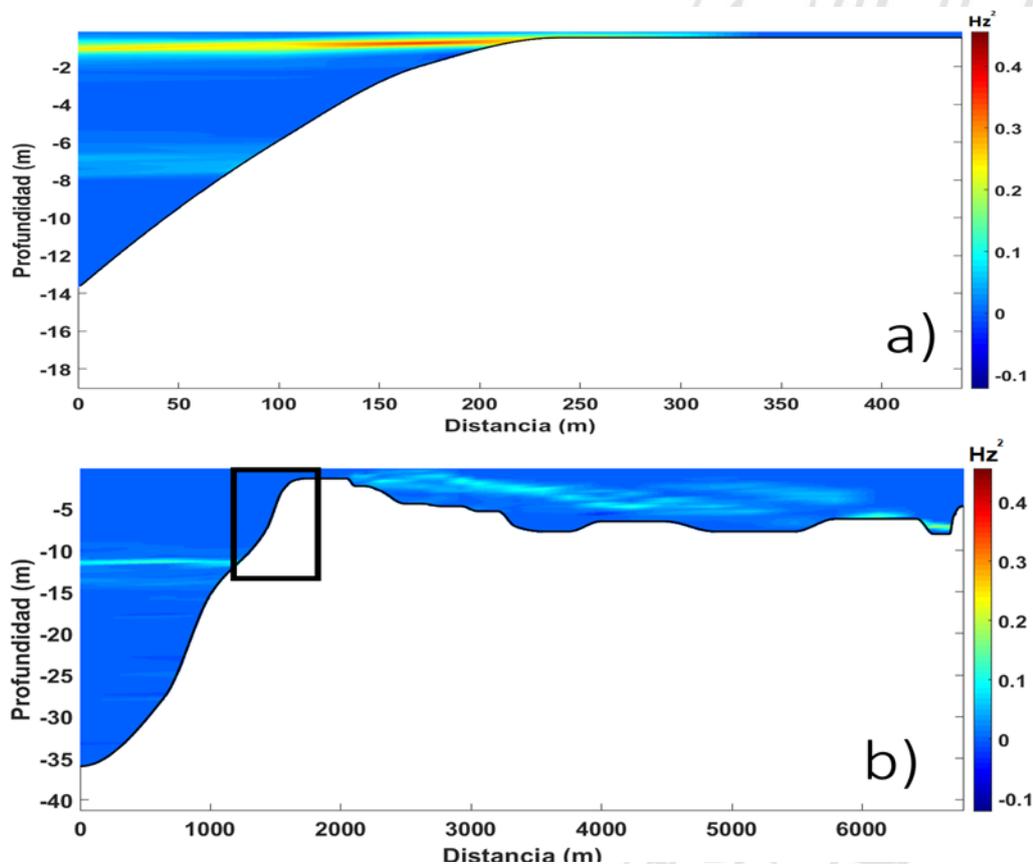


Figura 14. Frecuencia de Brunt-Väisälä para los transectos en el río Atrato: (a) época húmeda y (b) época seca. El recuadro en la figura (b) representa toda la sección de la figura (a)

De acuerdo con los resultados anteriores, durante la época húmeda del año 2018 se obtuvieron valores de la frecuencia de Brunt-Väisälä más altos que para la época seca del año 2019. Esto posiblemente porque el gradiente de salinidad entre las masas de agua en época húmeda fue mayor que el gradiente de salinidad entre las masas de agua en época seca.

4.2.6 Ángulo de Turner

A continuación, se presentan los resultados del cálculo del ángulo de Turner. Únicamente en estas gráficas se omitió suavizar el fondo (interpolar) marino debido a que se perdía información importante para el análisis.

En la figura 15.a entre 3 y 5 metros de profundidad se obtuvieron valores de ángulo de Turner entre 75° y 150° (colores azules y rojos intensos). Esto indica que esa parte de la columna de agua era estáticamente inestable puesto que, estos valores están por fuera del intervalo de estabilidad (ver Tabla 3). Este tipo de inestabilidad podría estar asociado a la cercanía a la batimetría escalonada y la convección difusa, sin embargo, la ubicación espacial es difícil de observar debido a la transición de colores. En general, se presentaron valores entre -47° y -72° (color cian) que sugieren una posible inestabilidad por convección difusa.

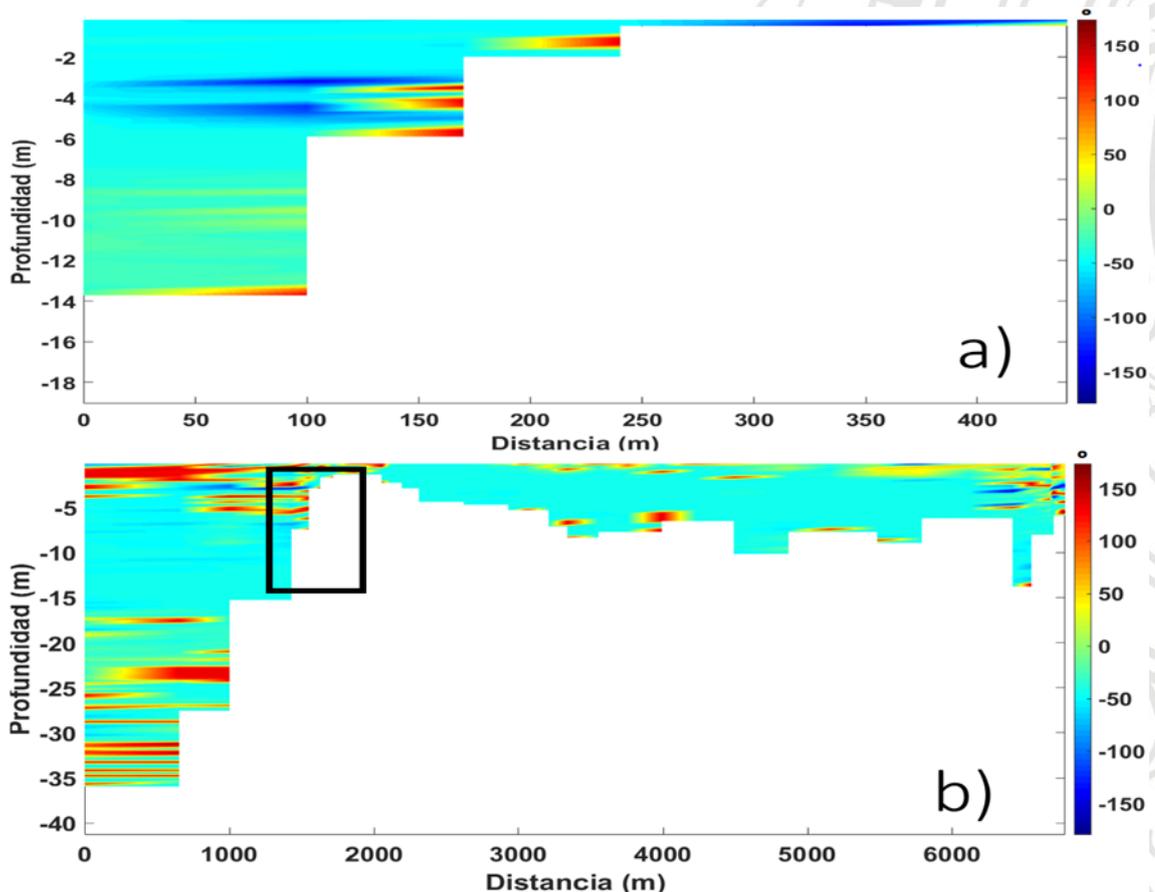


Figura 15. Ángulo de Turner para los transectos en el río Atrato durante: (a) época húmeda y (b) época seca. El recuadro en la figura (b) representa toda la sección de la figura (a)

En la figura 15.b, se obtuvieron valores altos del ángulo de Turner en la superficie y en el fondo cerca de la zona de la mayor pendiente de la batimetría probablemente asociado a las inestabilidades de Rayleigh-Taylor. En general, la columna de agua presenta transiciones de estabilidad a inestabilidad. Las inestabilidades pueden estar explicadas por la presencia de masas de agua densas por encima de masas de aguas menos densas, o por procesos difusivos de temperatura y sal. Adicionalmente, la presencia de la masa de agua cálida, encontrada anteriormente, pudo ser producir las inestabilidades superficiales.

4.3 Río León:

4.3.1 Salinidad

Durante la época húmeda, en la desembocadura del río León se registraron tres masas de agua de acuerdo con su salinidad (figura 16.a). En la parte inicial del transecto, se reveló una masa de agua con salinidades superiores a 30 (de origen oceánico) la cual se encontraba por debajo de los 5 metros. Sobre esta masa de agua salada, se presentó la haloclina entre los 4 y 6 metros de profundidad y por encima valores de salinidad promedio de 15. Estas características permitieron la configuración de una cuña salina en la parte exterior de la desembocadura del río León. La masa de agua mezclada que se registró en superficie avanza hasta los 1700 metros de distancia lineal, luego se presentó una masa de agua completamente dulce indicando la presencia del río León. Es de notar que, para la época húmeda, al igual que en el río Atrato, no hubo presencia de cuña salina sobre el cauce del río León.

Por otro lado, en época seca (figura 16.b) la salinidad que se presentó en el transecto fue homogénea en comparación con los resultados de la época húmeda. Se registraron salinidades alrededor de 10 en la zona exterior que disminuyeron gradualmente a medida que avanzaba en el trayecto. Estos valores homogéneos fueron debidos en parte al caudal bajo del río León y a que en época seca predominan los vientos alisios, los cuales producen un oleaje elevado y este genera mezcla en la columna de agua. Estos resultados coinciden con lo encontrado por Calderón (2019) en gran parte de golfo de Urabá para la época seca.

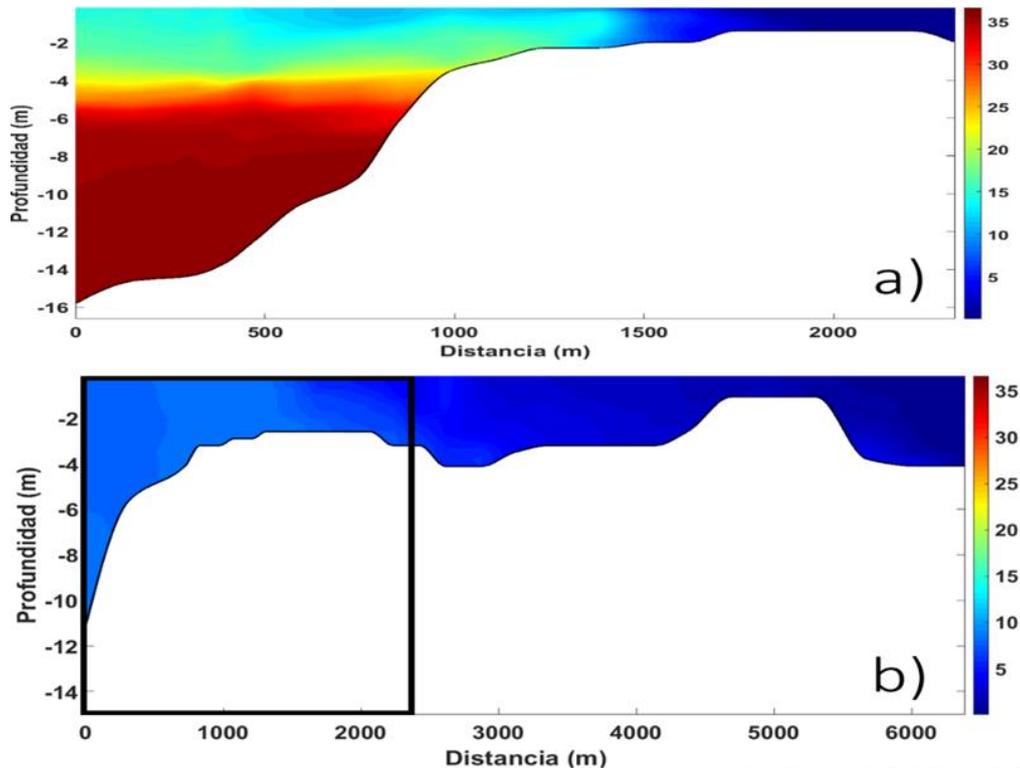


Figura 16. Valores de salinidad a lo largo del transecto del río León durante las épocas: (a) húmeda y (b) seca.

Adicionalmente, es necesario tener en cuenta el efecto producido por el nivel de marea ya que los datos fueron medidos alrededor de la marea alta, más energética. Los resultados sugieren que hubo una intrusión de masas de agua relativamente salobres en una distancia lineal de 3000 metros.

4.3.2 Temperatura

La figura 17.a evidencia la presencia de gradientes de temperatura en profundidad. Se reconoció una masa de agua con temperatura media de 31°C entre 2 y 8 metros, en medio de masas de agua superficiales y de fondo con temperaturas entre 28°C y 29°C. Este comportamiento es similar al encontrado durante la misma época en el río Atrato.

Autores como Guevara & Velázquez (2018) y Calderón (2019) evidenciaron la presencia de esta masa de agua cálida atrapada entre dos masas de agua con menor temperatura. Estos autores proponen como hipótesis que la masa de agua más cálida se encuentra atrapada a esa profundidad por el fuerte gradiente salino.

De otro lado, durante la época seca se registraron valores de temperatura homogéneos (entre 26.7°C y 27.5°C) comparados con la época seca. Esta característica del campo de temperaturas se relaciona a los aspectos previamente discutidos en torno al comportamiento de la salinidad (bajos caudales, alturas de oleaje significativas, mezcla de la columna de agua).

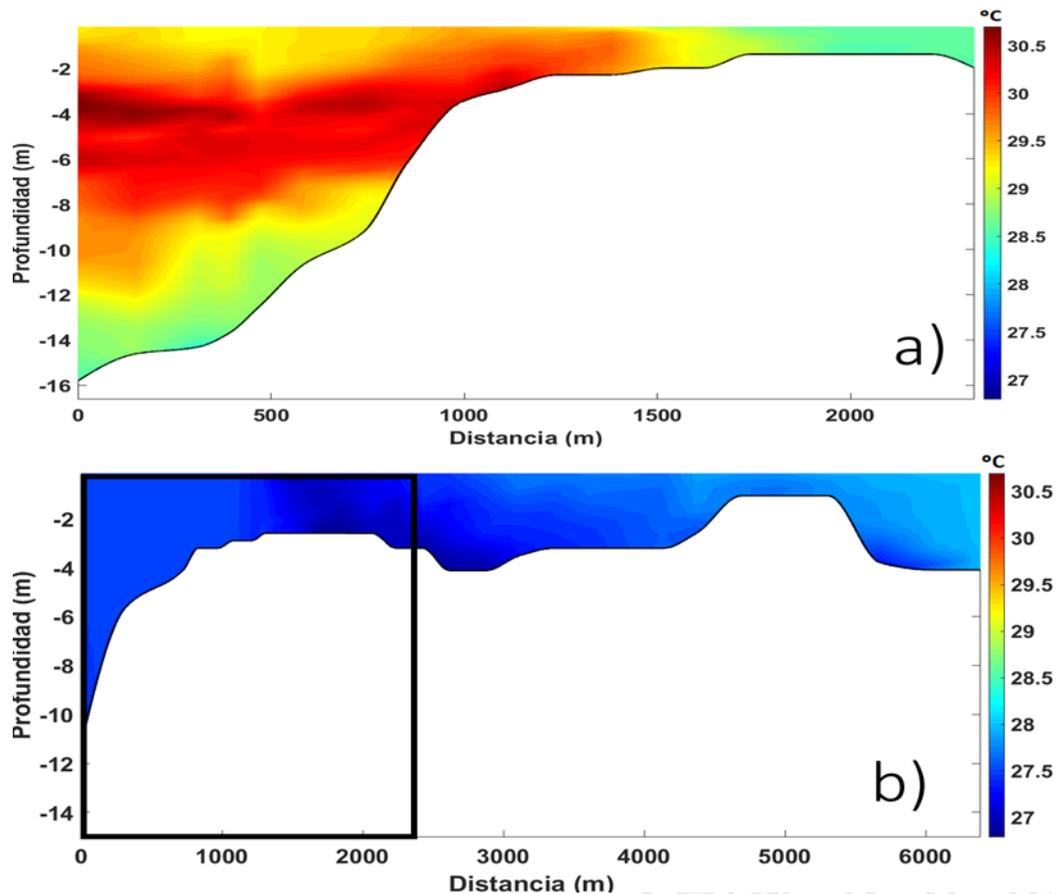


Figura 17. Valores de temperatura a lo largo del transecto del río León para la época: (a) húmeda y (b) seca.

4.3.3 Parámetro de estratificación

En la figura 18, se observan los valores de los parámetros de estratificación clásico y modificado. Los resultados muestran valores inferiores a 1 para ambas épocas climáticas y ambos parámetros durante los primeros 700 metros lineales, indicando que la masa de agua se encontraba parcialmente mezclada (figura 18.a). Luego entre los 750 y 1000 metros lineales, los parámetros toman valores cercanos a 1, indicando una posible estratificación. Entre los 1000 y 1500 metros se muestran valores entre 0.1 y 1.0 indicando que las masas de agua estaban parcialmente mezcladas.

A partir de los 1500 metros el parámetro modificado mostró valores menores o cercanos a 0.1 revelando que la masa de agua era homogénea. Por el contrario, el parámetro clásico, registró valores de hasta 2.5, lo cual daría a entender la presencia de dos masas distintas de agua. Sin embargo, como se había discutido anteriormente, esto fue debido en parte a la batimetría somera del canal del río.

Entre los 800 metros y 5000 metros lineales, los dos parámetros de estratificación (figura 18.b) describieron en general una columna de agua parcialmente mezclada con valores inferiores a 1. Se observan dos picos al inicio

(ambos parámetros) y final del transecto (solo el clásico) con valores superiores a 1 que indican una columna bien estratificada. En los picos al inicio de transecto, esto concuerda con las condiciones de salinidad del perfil. El pico que presenta el parámetro clásico se puede explicar (como se ha hecho hasta ahora) por los valores someros de batimetría.

En ambas épocas climáticas, fue evidente una cuña salina en la parte exterior del cauce de los ríos. Esto se vio reflejado gracias a los datos de salinidad/densidad de la columna de agua. Es de notar que, durante la campaña en época seca, se presentaron valores muy cercanos a cero, lo que sugiere la conformación de un estuario bien mezclado.

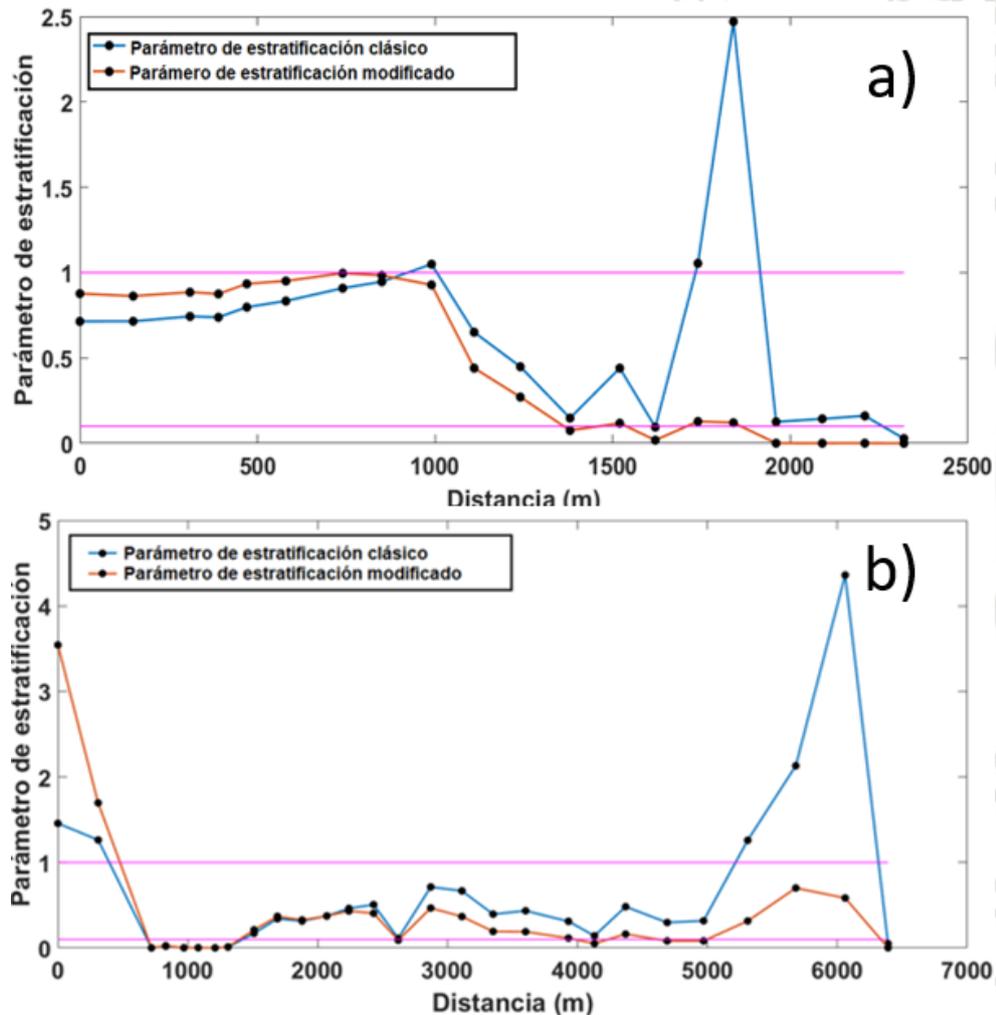


Figura 18. Parámetro de estratificación a lo largo del transecto del río León durante la época: (a) húmeda y (b) seca.

4.3.4 Frecuencia de Brunt-Väisälä

En la figura 19 se muestran los valores de la frecuencia de Brunt-Väisälä para las épocas húmeda y seca. Durante la época húmeda, entre los 3 y 5 metros de profundidad, se presentaron los mayores valores de esta frecuencia (color cian).

Es evidente que los valores que representan estabilidad están cerca de la haloclina. Aproximadamente a los 1500 metros lineales se registró tenuemente una zona de color más oscuro, lo cual indica frecuencias negativas. Esto coincide con la zona en donde se encontraron el agua mezclada del golfo y el agua dulce del río, lo cual puede generar turbulencia y a su vez, inestabilidad.

Por otro lado, en época seca (figura 19.b), el estuario presentó valores de frecuencia homogéneos en todo el transecto lo cual sugiere una columna de agua estable. Esto también se debe a que la columna de agua estaba totalmente mezclada (frecuencia cercana a cero). Es de notar, como las frecuencias altas en figura 19.a (4 a 6 metros de profundidad) desaparecieron en la figura 19.b. Por último, en la figura 16.b se presentó la haloclina entre los 1500 y 4500 metros lineales del transecto, zona en la cual se presentaron valores más altos en la frecuencia de Brunt-Väisälä.

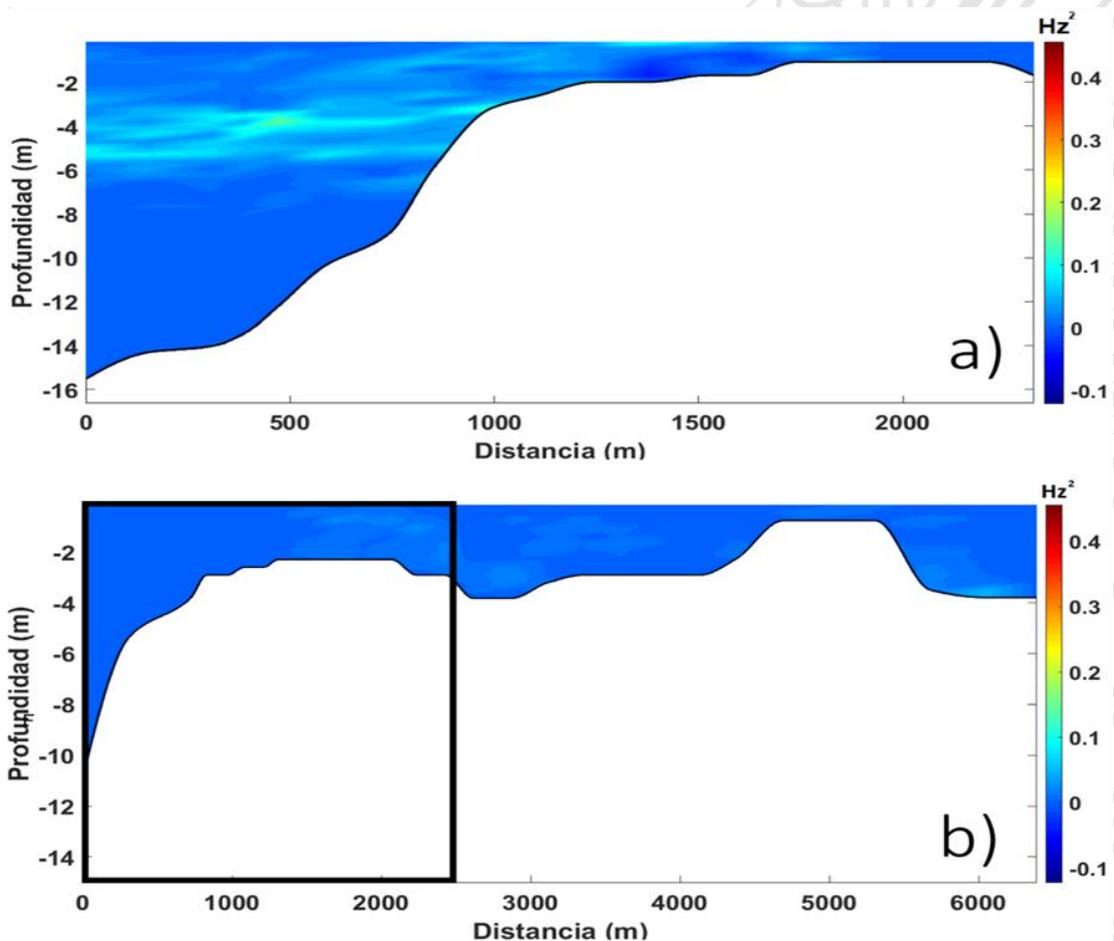


Figura 19. Frecuencia de Brunt-Väisälä a lo largo del transecto del río León para la época: (a) húmeda y (b) seca

4.3.5 Ángulo de Turner

En la figura 20 se presentan los valores del ángulo de Turner para las épocas húmeda y seca. La figura 20.a al inicio del transecto (zona profunda) y entre los 1300 y 1600 metros registró valores del ángulo asociados a una inestabilidad. Es de notar que esa misma inestabilidad se evidenció en los valores de la frecuencia de Brunt-Väisälä (figura 19.a). La inestabilidad encontrada entre los 1300 y 1600 metros probablemente fue debida al encuentro entre la masa de agua proveniente del río León y la masa de agua del Golfo, lo cual genera turbulencia y por lo tanto inestabilidad. De otro lado, la inestabilidad al inicio del transecto, (entre 8 y 16 metros de profundidad), se produjo probablemente por los procesos difusivos de temperatura y salinidad.

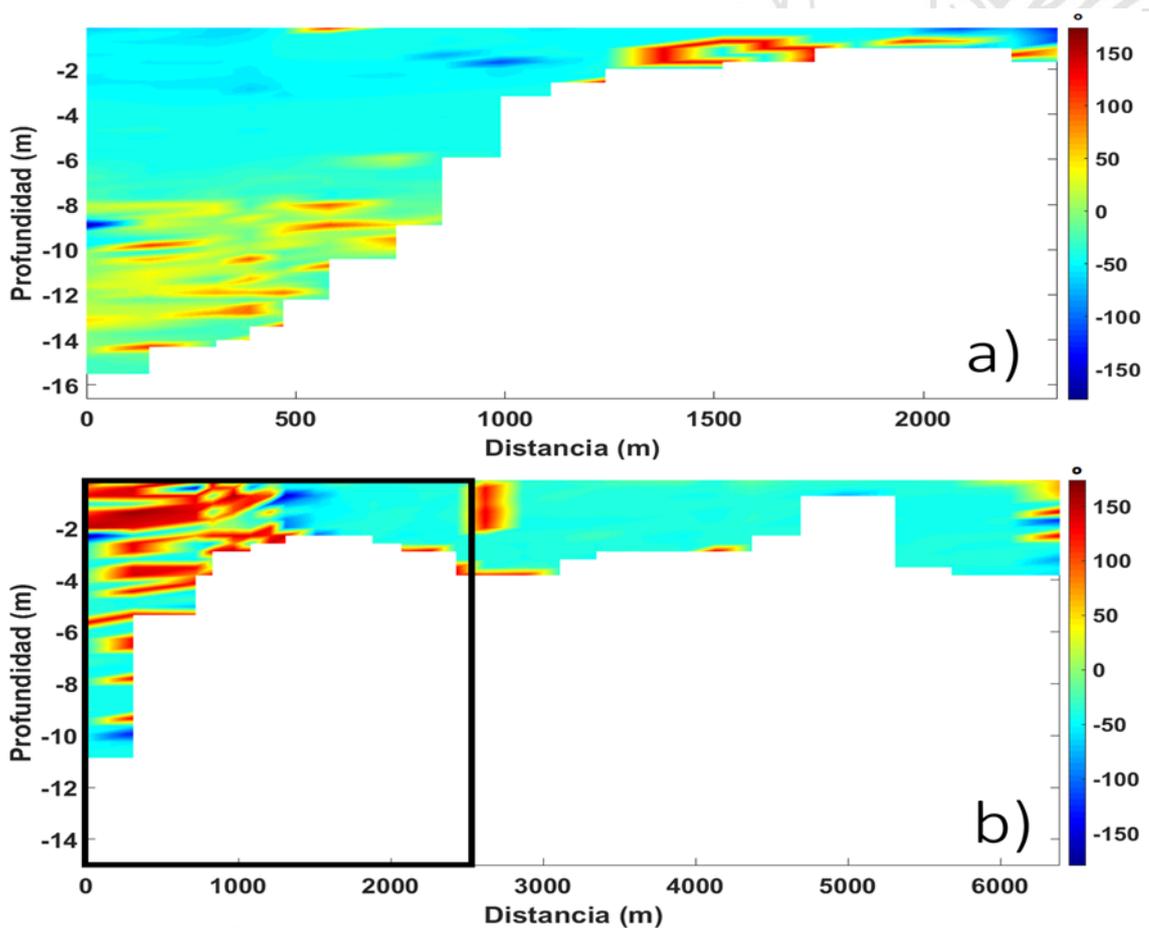


Figura 20. Ángulo de Turner a lo largo del transecto del río León para la época: (a) húmeda y (b) seca.

Para la época seca (figura 20.b), al inicio del transecto se obtuvieron valores del ángulo asociado a inestabilidades muy marcadas (color rojo). De acuerdo con los análisis mostrados anteriormente, esas inestabilidades pueden estar determinadas por los cambios verticales de temperatura y salinidad en la columna de agua.

Vale la pena notar como en la figura 15.b y figura 20.b se presentan inestabilidades al inicio del transecto en las zonas más profundas. En ambos casos los resultados son de la época seca, donde hay fuertes vientos y, por ende, un oleaje energético que mezcla la capa de agua. Si se suman esos factores al nivel bajo de caudal, la presencia de inestabilidades sería evidente, principalmente en forma de Rayleigh-Taylor.

De acuerdo con el atlas global climatológico (You, 2002) la doble difusión es un proceso que se presenta en el 44% de los océanos. El 30% se debe a los llamados dedos de sal y el 14% a la doble difusión convectiva. Según Pérez-Santos (2013), en la doble difusión convectiva la temperatura y la salinidad aumentan con la profundidad, entre tanto, en los procesos de dedos de sal ocurre todo lo contrario (Schmitt, 2001).

En general, en los transectos estudiados al parecer hubo presencia de inestabilidad debido a procesos de mezcla y cambios de temperatura. De acuerdo con lo anterior, tal y como se evidenció en las gráficas obtenidas a partir de los resultados de la presente investigación, las inestabilidades en color amarillo podrían estar asociadas a los dedos de sal, los colores cian a doble difusión salina y el color rojo a inestabilidad de Rayleigh-Taylor.

5 CONCLUSIONES

- La estratificación de la columna de agua en cercanías a las desembocaduras de los ríos Atrato y León está modulada en gran medida por el caudal de los ríos, y en menor proporción por el rango de marea. El estuario es bien estratificado si los caudales son altos y los vientos débiles y es parcialmente mezclado si los caudales son bajos y los vientos son intensos.
- Durante la temporada húmeda del año 2018, no se presentó intrusión salina en los cauces de los ríos. Por el contrario, en la época seca del año 2019, los resultados sugieren intrusiones salinas de hasta 3 kilómetros aproximadamente.
- El parámetro de estratificación modificado presentó resultados más adecuados al comportamiento físico de las masas de agua del golfo de Urabá, a diferencia del parámetro de estratificación clásico el cual presentó valores anómalos de acuerdo con el comportamiento de las masas de agua
- La masa de agua presentó características estables en la zona de la haloclina, de acuerdo con la frecuencia de Brunt-Väisälä. En el río León, el ángulo de Turner y la frecuencia de Brunt-Väisälä evidenciaron inestabilidades en época húmeda en los lugares donde se encontraron la masa de agua del golfo y la del río. En este lugar se genera turbulencia, lo que a su vez se muestra como una inestabilidad.
- La densidad de la columna de agua en las desembocaduras de los ríos Atrato y León y sus zonas aledañas están moduladas principalmente por la salinidad. Y en menor grado por la temperatura.

6 TRABAJO FUTURO

- Realizar campañas de medición de manera sistemática en las bocas de los ríos Atrato y León. De esta manera se podrá tener a largo plazo una caracterización adecuada de los deltas.



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguado, A. (2013). Determinación Numérica de la Influencia de las Condiciones de Borde Costeras Sobre la Longitud de una Cuña Salina en Estuarios. Aplicación a Estuarios Chilenos. Universidad de Chile – Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Pp. 78.

Bianchi, T. (2006). Estuarine science and biogeochemical cycles: Biogeochemistry of Estuaries. Oxford University Press. New York, United States.

Calderón, Y (2019). Variabilidad espacio-temporal del potencial energético salino por medio de mediciones *in situ* en el golfo de Urabá, mar Caribe colombiano. Universidad de Antioquia (Ciencias del Mar). Turbo, Colombia. pp. 42.

Chango Cañola, A. P. & Nacimba Loachamin, N. E. (2015). Propuesta de un Plan de Monitoreo de Estuarios y Evaluación de Calidad del Agua. Caso de Estudio: Estuario de la Subcuenca del Río Atacares. Escuela Politécnica Nacional – Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Quito, Ecuador. Pp. 5.

Chevillot P, Molina M, Giraldo L, Molina C (1993) Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. Boletín Científico CIOH (14). pp. 79-89.

Cushman-Roisin, B., & Beckers, J. M. (2011). Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects (Vol. 101). Academic press. United States. pp.349.

Fischer, H. B. (1976). Mixing and dispersion in estuaries. Annual Review of Fluid Mechanics, 8. pp. 107-133.

García, F., Palacio, C., & García, U. (2011) Constituyentes de la marea en la Bahía de Santa Marta (Colombia), Rev. Dyna, 167. pp. 142 – 150.

Guevara, J. C. & Velásquez, L. A. (2018). Caracterización Termohalina de la Región Central del Golfo de Urabá a Partir de la Descarga del Río Atrato. Universidad de Antioquia – Facultad de Ingeniería (Ciencias del Mar). Turbo, Colombia. pp. 48.

Guzmán, H., & Ceballos, J. L. (2001). La Difluencia del Río León Hacia el Caño Tumaradó. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM., Cundinamarca, Bogotá. pp. 41

Haralambidou K., Sylaios G., & Tsihrintzis V. (2010). Salt-wedge propagation in a Mediterranean microtidal river mouth. Estuarine Coastal and Shelf Science. 90(4). pp. 174-184.

Hernández Bustos, H. I. (2018). Variabilidad de la Estratificación y Mezcla en la Desembocadura del Delta del Río Magdalena. Universidad del Norte – Departamento de Física y Geociencias. Barranquilla, Colombia. pp. 42.

Hetland, D.R. (2005). Relating river plume structure to vertical mixing. *Journal of Physical Oceanography* 35. Texas, United States. pp. 1669-1688

IOC, S. (2010). IAPSO: The international thermodynamic equation of seawater-2010: Calculation and use of thermodynamic properties, Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No.56. UNESCO, Manuals and Guides, 56. pp. 1-196

MacCready, P. & Geyer, W. R. (2010). *Advances in Estuarine Physics*. Annual review of marine science. 2. pp 35-58.

Montoya, L. (2010). *Dinámica Oceanográfica del Golfo de Urabá y su Relación con los Patrones de Dispersión de Contaminantes y Sedimentos*. Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas, Medellín. pp. 254

Ospino, S. (2015). *Efecto del Caudal, la Marea y el Viento Sobre la Estructura y Posición de la Intrusión Salina en el Estuario del río Magdalena*. Universidad del Norte – Departamento de Física. Barranquilla, Colombia. Pp. 78.

Pérez-Santos, I., Garcés-Vargas, J., Schneider, W., Parra, S., Ross, L., & Valle-Levinson, A. (2013). Doble difusión a partir de mediciones de microestructura en los canales Martínez y Baker, Patagonia chilena central. *Latin american journal of aquatic research*,41. pp. 177-182

Perillo, G. M. E, (1995). *Definitions and geomorphologic classifications of estuaries: Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. ELSIVIER. Amsterdam, Netherlands

Perillo, G. M. E. & Cuadrado, G. D. (2013). *Geomorfología y características de los sedimentos estuariales (Principales características de los estuarios): Procesos químicos en estuarios*. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. pp. 14-47.

Pritchard, D. W. & Cameron, W. M. (1963). *Estuaries: The Sea*, 2. New York, United States. pp. 306–324.

Quintana, R. & Higueta, M. (2020). *Modulación de las corrientes oceánicas en el golfo de Urabá a partir de la onda de marea*. Universidad de Antioquia (Ciencias del Mar). Turbo, Colombia. pp. 40.

Schmitt, R.W. (2001). Double-Diffusive convection. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, R.A. Weller. pp. 310-314

Restrepo, J. & Correa, I. (2002). *Geología y oceanografía del delta del río San Juan: litoral pacífico colombiano*. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.

Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2004). *The Pacific and Caribbean rivers of Colombia: water discharge, sediment transport and dissolved loads*.

In Environmental geochemistry in tropical and subtropical environments. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 169-187.

Ruddick, B. R. (1983). A practical indicator of the stability of the water column to double-diffusive activity. *Deep-Sea Research.*, 30. pp. 1105-1107.

Thomas, F. Y., García, V. C., Cesaraccio, M. & Rojas, G. X. (2007). El paisaje en el golfo. En García-Valencia, C. (Ed). 2007. Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y Gobernación de Antioquia. Santa Marta, Colombia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar N.º 12. pp. 77 – 112.

Thomas, L. P. & Marino, B. M. (2016). Estimación del caudal a partir de la evolución del nivel del agua en un estuario con onda de marea estacionaria, Ribagua. pp. 12

Universidad de Antioquia (1997) Microcirculación atmosférica de la zona bananera de Urabá. Medellín. Universidad de Antioquia.

Valle-Levinson, A. (2010). Definition and classification of estuaries: Contemporary Issues in Estuarine Physics. Cambridge University Press. pp. 1– 11.

Velásquez, L. (2011). Análisis de sensibilidad a un modelo de transporte de sedimentos: golfo de Urabá, Colombia. Universidad de EAFIT. Escuela de ingeniería. Departamento de ingeniería civil. pp. 99.

You, Y. (2002). A global ocean climatological atlas of the Turner angle: implications for double-diffusion and water-mass structure. *Deep sea Res.*, 49. pp. 2075-2073