



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

LICENCIATURA DE OCEANOLOGIA



*“EFECTO DEL TEHUANO (FEBRERO 1996), SOBRE  
LOS PARÁMETROS DE LOS PARAMETROS  
HIDROLÓGICOS EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC:  
COMPARACION CON DATOS HIDROLOGICOS”.*

TESIS

Que para obtener el grado de

OCEANÓLOGO

Presenta

Esmeralda Erendira Mendoza Flores

ENSENADA B.C., Abril del 2010

## RESUMEN

Los eventos de viento llamados Tehuanos, se hacen presentes en el Golfo de Tehuantepec (**GT**) a lo largo del año pero principalmente en invierno (Noviembre — Febrero). Se refuerzan al disminuir el área por la cual atraviesan en una discontinuidad de la Sierra Madre de 40 Km de amplitud conocida como el Paso de Chivela. Estos vientos tienen gran importancia oceanográfica y económica al modificar la estructura hidrográfica del GT, se asocian con aumento de la Productividad Primaria (**PP**) y su enfriamiento superficial ha sido asociado a surgencias. En la expedición oceanográfica Tehuanos I, sugieren que el enfriamiento es consecuencia de una mezcla turbulenta entre las masas superficiales de agua. Este trabajo describe las condiciones hidrográficas del GT después de un Tehuano (16-27 de Febrero, 1996), y se compara la intensidad del viento con respecto a otras campañas oceanográficas hechas durante época de reforzamiento de los Tehuanos. Se reportan los resultados hidrográficos *in situ*, después de dicho evento de la campaña oceanográfica Tehuanos II.

La descripción de los parámetros se logró con el programa oceanográfico Ocean Data View (**ODV**) y está fundamentada con estadística descriptiva. Los resultados en la superficie muestran diferencias cuantitativas con los de Barton *et al.*, (2009) para la misma campaña, mas no así en su distribución de parámetros. El efecto más evidente se manifiesta en la distribución de la temperatura superficial que generó 3 zonas en el GT divididas por una franja de agua fría. Evidencias como la termoclina, nutriclina y oxiclina promedio sin que se hicieran más someras, a la ubicación promedio del Golfo en ausencia del reforzamiento de los Tehuanos y los valores altos de pH y Alcalinidad Total (**AT**) sugieren que la surgencia no es la responsable directa del enfriamiento de la superficie del GT, sino que más bien es efecto de una mezcla turbulenta entre las masas de Agua Superficial y Subsuperficial. La respuesta hidrológica durante Tehuanos II, fue mayor a la de Tehuanos I.

La distribución de las variables en Tehuanos II, en comparación con otras campañas durante Noviembre, Mayo y Agosto; sugieren que la intensidad de los vientos a finales de la temporada de invierno, son más semejantes a aquellos producidos durante el mes de julio, fecha en la que también se da una reintensificación de los Tehuanos, pero con una menor velocidad.

**“EFECTO DEL TEHUANO (FEBRERO 1996), SOBRE LOS  
PARÁMETROS HIDROLÓGICOS EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC:  
COMPARACIÓN CON DATOS HISTÓRICOS”.**

TESIS

QUE PRESENTA:

ESMERALDA ERENDIRA MENDOZA FLORES

APROBADA POR



MC. Héctor Bustos-Serrano



Dr. Guillermo E. Ávila-Serrano



MC. Francisco Ley Lou

### *Dedicatoria*

*Al ser que es la verdad única y universal, al que siempre está conmigo, al que solo mencionar su nombre dibuja una gran sonrisa en mi faz y con un aliento del viento por las mañanas es el primero en darme los buenos días y decirme a dejar huella en esta vida que te he prestado y en este paraíso que te he regalados, a ti mi amigo y padre a ti mi DIOS, porque contigo TODO es posible. TE AMO!!!!!!*

*A mi SUPER FAMILIA!!!!*

*A ti SUPER mami que, con tu fortaleza e inteligencia has sabido llevar a la familia y me mantienes en el camino de la vida. Tu manera de maravillarte y disfrutar de las cosas más pequeñas pero significativas, me han enseñado observar lo particular y no me has dejado satisfacer con banalidades. Tus consejos, paciencia, enseñanzas y cuidados, me han traído hasta aquí.*

*A ti PAPA oso que, con tu trabajo y esfuerzo no has dejado que nos detengamos en cumplir nuestros objetivos, tus enseñanzas en no creer en lo que siempre dicen y encontrar una explicación razonable de las cosas, han hecho de mi ir en busca del significado verdadero de los hechos.*

*A los dos; el significado de su existencia deja historia en su descendencia, que ruego a DIOS que pueda alcanzar una milésima parte de lo que significan.... LOS ADORO y LOS AMO!!!*

*A mis Hermanos de sangre y del alma Bere y Mauri que, con su inteligencia, seriedad, tenacidad, bondad, y locuras han enriquecido mi ser.*

*A mis ángeles en la Tierra a mis abuelitos: de dulce Juan<sup>+</sup> y Rosario, su interés y asombro ante la explicación de los sucesos naturales, me impulsaba a conocer más e investigar a fondo sobre el tema.*

*de leche Lulú y Gregorio. Abu Luquitas, usted es la estafeta de la familia, su bondad hacia los demás, fortaleza e inteligencia siempre la llevare como bandera de enseñanza.*

*Abu Goyito, esas manos toscas grandes que siempre se midieron con las manos de los nietos, las admiro y adoro, su espíritu incansable, de fortaleza y arduo trabajo que ha pasado en generación son mi ideal a seguir.*

*A la Familia Flores-García, García Flores y Arellano por ser mi punto de apoyo.*

*“Veo que un hombre debe optar por no introducir innovaciones y si lo hace, debe convertirse en un esclavo para defenderlas...Platón es mi amigo, Aristóteles es mi amigo, pero mi mejor amiga es la verdad”...Isaac Newton.*

*“La música como la ciencia, no tienen bandera ni lenguaje son universales”...EEMF.*

## AGRADECIMIENTOS.

*A DIOS, por cuidar de mi familia y de mí en todo tipo de situaciones, porque mientras ando en la aventura de la vida, de lo único que realmente estoy segura, es que siempre voy de la mano contigo. Gracias a mi amigo y padre, por prestarme vida para seguir en el camino de mis sueños.*

*A mis padres, por sus cuidados y en algunos casos una sobreprotección, por consentirme, porque siempre han respetado mis decisiones y mi libertad. Gracias por su confianza, gracias porque siempre creen más en mí que yo misma, gracias por consentir mis caprichos.*

*Mami, por ser una mujer ejemplar y mi ideal, al enseñarme a no dejar que nunca nadie me diga que no se puede hacer, siempre defender mis ideales y forjar en mí un carácter de arriba y adelante !!! Gracias por ser tan chistosa, por siempre encontrar la manera de reconfortarnos y divertirnos, gracias por tu espíritu de energía incansable y vitalidad.*

*Gordito, por tu cariño, amor, cuidados y ejemplo de salir a aventurarte a la vida aunque fueras muy joven y tu espíritu de no conformismo e ir siempre en busca de mejorar, enriqueciendo el alma y la mente, han hecho de mí querer explorar más allá de lo observado.*

*Bere, por ser mi compañía en las buenas y en las malas, por festejar mis logros y no dejar que pasen inadvertidos, por echarme porras, por tu inteligencia, por ser tan terca pero también serena, porque con el hecho de saber que estás aquí se que todo estará bien, por cuidar siempre de mí.*

*Mau, por ser mi amigo de juegos, por ser un dulce desde pequeño a pesar de las maldades que te hacía, por tu compañía, por tu gran madurez, porque contigo el rock entro a mi vida. Gracias porque siempre sigues tus sueños sin importar lo que los demás digan, por tus locuras y atreverte a arriesgar con tal de cumplir tus objetivos, gracias porque en nuestras peleas no se distinguieron géneros e hicieron que aprendiera como defenderme.*

*Hermanos y Primos Hermanos; porque juntos hemos creado historias mágicas, como olvidar nuestras exploraciones al bosque, nuestro club, las caras de enojo que les sacábamos a los abuelitos en especial a Goyito, por andar toreando a los animales. Gracias porque a su lado siempre es divertido.*

*Abuelitos, por sus comidas, dulces, por sus frases tan ocurrentes, por ser tan graciosos, porque su compañía y casa siempre fue mi parque de diversión. Gracias por todo su amor.*

*Tíos, por su amor y el estar presente en toda situación.*

*A mis mejores amigas desde la infancia Marlen (piojito) y Eli (six flags), porque con ustedes las facetas dentro y fuera de lo académico, las carcajadas eran el pan de cada día, por involucrarme en situaciones en las que no sé como rayos le hacíamos que saliéramos bien libradas de todo. Por compartir sueños, logros, la silla de la dirección, las escapadas de clase, las huelgas, porque hemos compartido más cuadros de honor que orejas de burro, por no dejarme*

*sola cuando tenía que tomar decisiones, por cuidarme en todo momento, por compartir liderazgo en nuestros proyectos, por saber cómo curar nuestros corazones rotos y vengarnos de quien nos hacía daño. Gracias, porque tengo la bendición de su amistad que ni el tiempo ni la distancia ha separado.*

*A mi alma mater la FCM, porque en ella encontré madurez, sabiduría, conocimiento, amistad, aventura y adicción al café, porque entre tus muros y frente a un lujo que es el mar, la aventura de ser Universitario será siempre una de las facetas más excitantes de mi vida, en ella dejo historias y guardo recuerdos que amo, el significado de oceanólogo en lo académico como en lo personal, engloba todas las experiencias, en ti las personas se ponen a prueba para elegir cómo equivocarse, superar las pruebas, tentaciones y enfrentar los obstáculos para llegar a la meta, solo los más ávidos llegan al final, en ti llegan niños y salen adultos. Ser oceanólogo representa: "...es normal que le temas a lo que no conoces, pero te enseña que la vida es un goce, así que solo quiere verte volar...Shakira". Amo mi alma mater y todo lo que representa...amo a mi FCM*

*A todos mis profesores (a) que ayudaron a aumentar mis conocimientos.*

*A Zarko, Pako y Ali, porque desde un principio, y sin tener un mes que nos conocíamos, jamás olvidare su preocupación y cuidados en el momento en el que enseñadita me recibía con mi primer robo de muchos en el apartamento, su camping en la sala y sus llamadas para preguntar como estaba, me hicieron saber que a pesar de que estaba lejos de casa, no tenía de que preocuparme porque enseñada también me daba una nueva familia.*

*Gracias Pakillo, porque tú me ilustraste las formas en las que se presentaban algunas cosas medio alucinantes, pero jamás dejaste que las probara, porque siempre con una sonrisa me decías "no morrita, esto no es para ti" y te alejabas, gracias porque tus utopías me alegraban los días, tus malviajes en clase hacían que todos repasáramos varias veces el mismo tema por una semana, yo se que lo hacías por el bien del equipo, así todos teníamos un diez asegurado, además era un deleite ver como los profs se ponían de histeria cada que levantabas la mano, contigo vi como alguien puede sudar en exceso o temblarle tanto las manos con tal de no pegar un golpe... como te recordaran Adán y la chuchis?, por estar medio loquito, por tus cuidados y cariño, donde sea que te encuentres gracias.*

*Zarkodino, por siempre estar cuando te necesito, porque aun hasta la fecha eres una de las personas más especiales con las que me he cruzado, tu y Yuyis son mi pareja favorita, con ustedes los campings a la playa son prolongadas y muy divertidas, gracias por sus cuidados y preocupación y también por consentirme, porque a su lado siempre me he sentido segura.*

*Christian, por ser mi amigo, acudir a mi ayuda cada que me pasaba algo con solo cruzar la carretera que era casi siempre, por aquellas charlas hasta el amanecer, por ser mis oídos y mi hombro, por ser en ocasiones mi guarura cuando las fiestas se ponían medio lokas, por tu desesperación para acabar el trabajo mientras los demás andábamos en el relajo, contigo nos teníamos que poner las pilas.*

*Candy, por haber sido mi amiga, por cuidar de mí en mis gripes extensas, porque las dos fuimos oídos y hombro, porque cuidábamos una de la otra, porque nuestros depas los hicimos casa de cada una.*

*A Pamelita, por tu carácter, por aceptar a la persona con defectos y virtudes, porque nunca les diste la espalda a tu equipo, siempre estuviste cuando se te necesitaba, por ser autentica, inteligente y luchona, porque sigues estando medio loquita, por tus metidas de pata pero más por tus aciertos, por ser tan tierna, porque el recuerdo más hermoso que siempre atesorare de ti, es que en tus palabras me recordaste que aquella niña que cantaba y platicaba a diario con DIOS tenía que regresar, por respetar mi ideología y no imponer tus creencias, porque hacemos de un tema toda una charla de horas, por cuidar nuestra amistad, por brindarme tu hogar como el mío, por siempre estar para mí, por cuidarme, por consentirme, me encanta ser tu amiga gracias. Que Dios te bendiga!!!*

*Diego porque en ti he encontrado un nuevo amigo, por tu tolerancia, por tus cuidados, por tu preocupación, por consentirme, por el café, por la amistad que espero siga creciendo, por todo gracias.*

*Chelita y Arturo, por su amistad, porque siempre puedo contar con ustedes, por las charlas, por su preocupación, por sus cuidados, por todo gracias.*

*Rosita y Keren, por ser buenas amigas conmigo, por sus ocurrencias, consejos, porque siguen a mi lado. Keren, gracias por tus regañones del que siempre comía fuera y ser mi chef de alta cocina cada que me visitabas.*

*Lau, Melody, Fernando, Chuy, Alonso....a todos los que conformaron mi generación ESCARAMUJOS, porque con ustedes me divertía entre clase con las ocurrencias de cada uno, por ser buen equipo, porque a diario su presencia enriquecía mi ser.*

*A mis chicos maravilla de mis sonsacadas a parrandear, Susi, Cesar, Ismael, Rebeca y Moshe, porque con ustedes conocí lugares padrísimos, personas muy graciosas, comida medio rara, por consentir mis caprichos y siempre llevarme a la bufadora solo por mis tamales, gracias porque con ustedes pude aplicar la física al calcular la velocidad en la que puede llegar un auto y la manera de cómo usar un collarín, gracias por todo. A ustedes nenes Shallomm!!!*

*A mi Director de Tesis MC. Héctor Bustos Serrano, por proveerme de los datos e información que hicieron que me guiara en la realización de la Tesis, por su apoyo para que asistiese a mis primeros congresos y simposios nacionales e internacionales, por su paciencia amabilidad, tiempo y dedicación en la revisión del trabajo y por su preocupación hacia mi persona.*

*A mi sinodal Guillermo Ávila, por sus comentarios, paciencia y tiempo en la revisión de Tesis así como su compañía ocurrente.*

*A mi sinodal Francisco Ley Lou, por sus comentarios, paciencia y tiempo en la revisión de Tesis y por su preocupación hacia mi persona.*

*A los que participaron en la campaña Tehuanos II, por proveerme de la información para realizar este escrito.*

*Al Dr. Gilo Gaxiola, por proveerme de información sobre el tema.*

*A la Dra. Adriana Gonzales y Dr. Eduardo Santamaría que, aunque no se pudieron realizar algunos objetivos que visualizábamos con los datos, sus comentarios e información enriquecieron este trabajo.*

*A ti, que abres este escrito porque me permites ilustrarte con palabras y figuras una pequeña parte de las maravillas que creo DIOS y que ni el más ávido cineasta podría recrear, porque es más fascinante lo que la naturaleza tiene de lo que te puedes imaginar.*

*Gracias, gracias, gracias a todos y a cada una de las personas que me he encontrado en esta aventura de formar parte de un grupo exquisito y selecto, el ser oceanóloga y que con sus experiencias y sabiduría han enriquecido mi ser.*

*Agradezco a mi locuaz porque...*

*“...prefiero estar mil veces loco que estar cuerdo y volverme loco...La libertad Sancho, es uno de los más preciosos dones que a los hombres dieron los cielos. Con ella no pueden igualarse los tesoros que encierra la tierra ni cubre el mar; por la libertad, así como por la honra, se puede y se debe aventurar la vida. Y por el contrario, el cautiverio es el mayor mal que puede venir a los hombres.” (Miguel de Cervantes; “Don Quijote de la Mancha”).*

*“Sueña, Vive y Disfruta...Una sonrisa es el reflejo del alma de la vida, no dejes que nada ni nadie la apague...VIVE” (EEMF).*

## **CONTENIDO**

|                                                                                       | <b>Página</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| RESUMEN                                                                               | <b>I</b>      |
| APROBACION                                                                            | <b>II</b>     |
| DEDICATORIA                                                                           | <b>III</b>    |
| AGRADECIMIENTOS                                                                       | <b>IV</b>     |
| INDICE                                                                                | <b>VIII</b>   |
| LISTA DE FIGURAS                                                                      | <b>XI</b>     |
| LISTA DE TABLAS                                                                       | <b>XIII</b>   |
| <b>1. INTRODUCCION.</b>                                                               | <b>1</b>      |
| <b>2. ANTECEDENTES.</b>                                                               | <b>6</b>      |
| <b>3. JUSTIFICACION.</b>                                                              | <b>11</b>     |
| <b>4. OBJETIVOS.</b>                                                                  | <b>11</b>     |
| <b>5. HIPOTESIS.</b>                                                                  | <b>11</b>     |
| <b>6. AREA DE ESTUDIO.</b>                                                            | <b>12</b>     |
| <b>6.1</b> Características Oceanográficas.                                            | <b>13</b>     |
| <b>6.2</b> Variabilidad de las corrientes marinas y los Tehuanos en el lapso del año. | <b>15</b>     |
| <b>6.3</b> Hidrología.                                                                | <b>17</b>     |
| <b>6.4</b> Eventos Interanuales.                                                      | <b>18</b>     |
| <b>6.5</b> Características Económicas.                                                | <b>18</b>     |
| <b>7. METODOLOGIA</b>                                                                 | <b>19</b>     |
| <b>7.1</b> Campaña Tehuanos II.                                                       | <b>19</b>     |
| <b>7.2</b> Colecta de muestras y técnica de análisis.                                 | <b>20</b>     |
| <b>7.3</b> Procesamiento de Datos.                                                    | <b>22</b>     |
| <b>7.4</b> Análisis de Datos.                                                         | <b>22</b>     |
| <b>7.4.1</b> Temperatura.                                                             | <b>23</b>     |
| <b>7.4.2</b> Oxígeno Disuelto.                                                        | <b>25</b>     |

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.4.3 NID ( $\text{NO}_3^-$ y $\text{NO}_2^-$ ).                                                 | 26 |
| 7.4.4 pH.                                                                                        | 26 |
| 7.5 Descripción de Resultados.                                                                   | 27 |
| 8. RESULTADOS.                                                                                   | 29 |
| 8.1 Temperatura                                                                                  | 29 |
| 8.1.1 Distribución en la Horizontal.                                                             | 29 |
| 8.1.2 Perfil ó Distribución en la Vertical.                                                      | 30 |
| 8.1.3 Perfil por zona.                                                                           | 31 |
| 8.1.4 Perfil por Transecto.                                                                      | 33 |
| 8.2. Salinidad.                                                                                  | 38 |
| 8.2.1 Distribución en la Horizontal.                                                             | 38 |
| 8.2.2 Perfil ó Distribución en la Vertical.                                                      | 38 |
| 8.3. Diagrama Temperatura – Salinidad (T – S)                                                    | 41 |
| 8.4. Oxígeno Disuelto.                                                                           | 45 |
| 8.4.1 Distribución Horizontal; análisis de UAO.                                                  | 45 |
| 8.4.2 Distribución Horizontal; análisis por horario.                                             | 47 |
| 8.4.3 Perfil ó Distribución en la Vertical.                                                      | 49 |
| 8.4.4 Perfil; relación Oxígeno-Temperatura.                                                      | 52 |
| 8.4.5 Perfil; análisis por zona.                                                                 | 54 |
| 8.4.6 Perfil; análisis por transecto.                                                            | 55 |
| 8.5. Nutrientes Nitrogenados (NID), Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). | 62 |
| 8.5.1 Distribución espacial de $\text{NO}_2^-$ y $\text{NO}_3^-$ .                               | 62 |
| 8.5.2 Relación NID-Oxígeno.                                                                      | 64 |
| 8.5.3 Distribución Horizontal de NID a 0, 20 y 50 m de profundidad.                              | 65 |
| 8.6. pH y AT.                                                                                    | 68 |
| 8.6.1 Distribución Horizontal de pH y AT.                                                        | 68 |
| 8.6.2 Perfil ó Distribución Vertical de pH y AT.                                                 | 70 |
| 8.6.3 Relación pH con temperatura, salinidad y oxígeno.                                          | 74 |
| 8.6.4 Relación pH-Densidad.                                                                      | 77 |
| 9. DISCUSIONES.                                                                                  | 78 |

|                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>9.1 Temperatura</b>                                                                         | <b>78</b>  |
| <b>9.1.1</b> Análisis en la superficie; comparación con Tehuanos I.                            | <b>78</b>  |
| <b>a)</b> Formación de una franja de agua fría como producto del Tehuano.                      | <b>78</b>  |
| <b>b)</b> Trayectoria de la franja de agua fría.                                               | <b>81</b>  |
| <b>c)</b> Formación de un giro anticiclónico; dinámica del GT.                                 | <b>82</b>  |
| <b>d)</b> Tiempo de vida del Tehuano y de su efecto.                                           | <b>85</b>  |
| <b>e)</b> Temperatura <i>in situ</i> .                                                         | <b>87</b>  |
| <b>9.1.2</b> Análisis en la superficie; comparación con otras campañas oceanográficas.         | <b>90</b>  |
| <b>9.1.3</b> Análisis general en la Vertical; comparación con Tehuanos I.                      | <b>93</b>  |
| <b>9.1.4</b> Análisis en la Vertical por transecto; comparación con Tehuanos I.                | <b>95</b>  |
| <b>9.2. Salinidad</b>                                                                          | <b>99</b>  |
| <b>9.2.1</b> Análisis en la Horizontal.                                                        | <b>99</b>  |
| <b>9.2.2</b> Análisis en la Horizontal; comparación con otras campañas oceanográficas.         | <b>100</b> |
| <b>9.3. Diagrama T – S; análisis de las masas de agua.</b>                                     | <b>103</b> |
| <b>9.4. Oxígeno</b>                                                                            | <b>105</b> |
| <b>9.4.1</b> Análisis en la Horizontal; comparación con otras campañas oceanográficas.         | <b>105</b> |
| <b>9.4.2</b> Análisis en la Horizontal por horario.                                            | <b>108</b> |
| <b>9.4.3</b> Análisis en la Vertical; relación Oxígeno- Temperatura.                           | <b>109</b> |
| <b>9.4.4</b> Análisis en la Vertical por zona y transecto.                                     | <b>110</b> |
| <b>9.4.5</b> Análisis en la Vertical; comparación con otras campañas oceanográficas.           | <b>113</b> |
| <b>9.5. NID (<math>\text{NO}_2^-</math> y <math>\text{NO}_3^-</math>)</b>                      | <b>115</b> |
| <b>9.5.1</b> Análisis general de la distribución espacial.                                     | <b>115</b> |
| <b>9.5.2</b> Análisis en la Vertical; comparación con otras campañas oceanográficas.           | <b>117</b> |
| <b>9.5.3</b> Análisis en la Superficie; comparación con otras campañas oceanográficas.         | <b>120</b> |
| <b>9.6. pH y AT</b>                                                                            | <b>120</b> |
| <b>9.6.1</b> Análisis general de pH y AT; comparación con otras campañas.                      | <b>127</b> |
| <b>9.6.2</b> Análisis en la Horizontal de pH y AT; relación pH–oxígeno.                        | <b>127</b> |
| <b>9.6.3</b> Análisis en la Vertical de pH y AT; relación pH–oxígeno, temperatura y salinidad. | <b>128</b> |
| <b>9.6.4</b> Análisis en la Vertical de pH; relación pH–Densidad.                              | <b>129</b> |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| <b>10. CONCLUSIONES</b> | <b>131</b> |
| <b>11. BIBLIOGRAFIA</b> | <b>135</b> |

## **LISTA DE FIGURAS**

### **Número de Figura por Capítulo y Subcapítulo.**

|                                                                                                                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6.1</b> Mapa de la zona del Pacífico Tropical Oriental, sobre la cual se encuentra el área de estudio.                                                                             | <b>12</b> |
| <b>7.1</b> Ubicación de los transectos y estaciones muestreadas durante Tehuanos II.                                                                                                  | <b>22</b> |
| <b>8.1.1</b> Distribución de las temperatura superficial <i>in situ</i> (°C), obtenidas después del Tehuano durante la campaña oceanografía Tehuanos II (16-27 de Febrero de 1996).   | <b>29</b> |
| <b>8.1.2</b> Perfil de Temperatura en la campaña Tehuanos II                                                                                                                          | <b>31</b> |
| <b>8.1.3</b> Perfil de Temperatura por transectos en la campaña Tehuanos II.                                                                                                          | <b>35</b> |
| <b>8.2.1</b> Distribución horizontal de salinidad, determinada por datos <i>in situ</i> obtenidos durante Tehuanos II.                                                                | <b>38</b> |
| <b>8.2.2</b> Perfil de Salinidad en la campaña Tehuanos II.                                                                                                                           | <b>39</b> |
| <b>8.3.1</b> Diagrama T-S en la campaña Tehuanos II.                                                                                                                                  | <b>41</b> |
| <b>8.3.2</b> Diagrama T-S de 0-30 m de profundidad.                                                                                                                                   | <b>42</b> |
| <b>8.3.3</b> Diagrama T-S de 40-500 m de profundidad.                                                                                                                                 | <b>43</b> |
| <b>8.3.4</b> Diagrama T-S de 500 y 1,000 m de profundidad.                                                                                                                            | <b>44</b> |
| <b>8.3.5</b> Diagrama T-S de 1,500 y 2,500 m de profundidad.                                                                                                                          | <b>44</b> |
| <b>8.4.1</b> Distribución del oxígeno disuelto superficial <i>in situ</i> (μM), obtenidas después del Tehuano durante la campaña oceanografía Tehuanos II (16-27 de Febrero de 1996). | <b>46</b> |
| <b>8.4.2</b> Distribución de Uso Aparente de Oxígeno (UAO) y Oxígeno Disuelto en μM/Kg en Tehuanos II.                                                                                | <b>47</b> |
| <b>8.4.3</b> Perfil de oxígeno disuelto de 0 – 100 m de profundidad en Tehuanos II.                                                                                                   | <b>50</b> |
| <b>8.4.4.</b> Perfil total de oxígeno disuelto en Tehuanos II                                                                                                                         | <b>52</b> |
| <b>8.4.5.</b> Perfil de Oxígeno con respecto a la temperatura en Tehuanos II.                                                                                                         | <b>53</b> |
| <b>8.4.6.</b> Correlación Oxígeno–Temperatura en Tehuanos II.                                                                                                                         | <b>54</b> |
| <b>8.4.7.</b> Transecto de la zona Oeste en Tehuanos II. Perfil de O <sub>2</sub> y Perfil de UAO.                                                                                    | <b>57</b> |
| <b>8.4.8.</b> Transecto de la zona Centro en Tehuanos II. Perfil de O <sub>2</sub> y Perfil de UAO.                                                                                   | <b>60</b> |
| <b>8.4.9.</b> Transecto de la zona Este en Tehuanos II. Perfil de O <sub>2</sub> y Perfil de UAO.                                                                                     | <b>61</b> |
| <b>8.5.1.</b> Perfil de 0-100 m de profundidad de NID en μM.                                                                                                                          | <b>63</b> |
| <b>8.5.2.</b> Perfil de NID y oxígeno disuelto de 0-100 m de profundidad de acuerdo al promedio de cada estrato de agua.                                                              | <b>65</b> |

|                                                                                                                                                                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8.5.3. Variacion Horizontal de NID (<math>\mu\text{M}</math>) en la superficie.</b>                                                                                                                                       | <b>66</b>  |
| <b>8.5.4. Variacion horizontal del NID (<math>\mu\text{M}</math>) a 20 m de profundidad.</b>                                                                                                                                 | <b>67</b>  |
| <b>8.5.5. Variacion horizontal del NID (<math>\mu\text{M}</math>) a 50 m de profundidad.</b>                                                                                                                                 | <b>68</b>  |
| <b>8.6.1. Distribución superficial de pH en el GT durante la campaña Tehuanos II</b>                                                                                                                                         | <b>69</b>  |
| <b>8.6.2. Distribución superficial de AT en el GT durante la campaña Tehuanos II</b>                                                                                                                                         | <b>70</b>  |
| <b>8.6.3. Perfil de pH de 0 – 2,500 m y de 0 - 100 m de profundidad.</b>                                                                                                                                                     | <b>71</b>  |
| <b>8.6.4. Perfil de AT (<math>\mu\text{M/Kg}</math>) de 0 – 100 m de profundidad y Relación de pH - AT, de acuerdo a los promedios.</b>                                                                                      | <b>73</b>  |
| <b>8.6.5. Relación de distribución vertical de temperatura, salinidad, oxígeno y pH, de acuerdo a los valores promedio de cada estrato de agua muestreada en toda la columna de agua y en la zona eutrófica (0 a 100 m).</b> | <b>75</b>  |
| <b>8.6.6. Relación de distribución vertical de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y dióxido de carbono total, con respecto al pH en la zona eutrófica del GT.</b>                                                      | <b>76</b>  |
| <b>8.6.7. Relación de distribución vertical de la densidad con la temperatura, salinidad y pH, en la zona eutrófica del GT.</b>                                                                                              | <b>77</b>  |
| <b>9.1.1 Imágenes satelitales obtenidas para la campaña Tehuanos I de 1989.</b>                                                                                                                                              | <b>79</b>  |
| <b>9.1.2 Imágenes satelitales obtenidas para la campaña Tehuanos II de 1996.</b>                                                                                                                                             | <b>80</b>  |
| <b>9.1.3. Imágenes del remolino anticiclónico detectados en Tehuano I, Enero 30 de 1989 y en Tehuanos II, Febrero 11 de 1996.</b>                                                                                            | <b>83</b>  |
| <b>9.1.4. Corrientes superficiales en el GT durante la época de Nortes, de Octubre a Enero y de Febrero a Abril.</b>                                                                                                         | <b>84</b>  |
| <b>9.1.5. Rotacional del viento en el GT analizada por Quijano Roviroza (2007).</b>                                                                                                                                          | <b>86</b>  |
| <b>9.1.6 Imagen de satélite de un evento subsecuente al evento de viento en Tehuanos II, detectado en Marzo 12 de 1996.</b>                                                                                                  | <b>87</b>  |
| <b>9.1.7. Distribución de las temperaturas superficiales <i>in situ</i>, en Tehuanos I.</b>                                                                                                                                  | <b>88</b>  |
| <b>9.1.8. Variación de la temperatura superficial en la campaña FIQUIMBI I.</b>                                                                                                                                              | <b>91</b>  |
| <b>9.2.1. Variación superficial de la salinidad en las campañas FIQUIMBI I, SALCRU II, FIQUIMBI II y SALCRU I.</b>                                                                                                           | <b>102</b> |
| <b>9.4.1. Variación del oxígeno (<math>\mu\text{M}</math>) a 5 m de profundidad, en la campaña FIQUIMBI I.</b>                                                                                                               | <b>107</b> |
| <b>9.4.2. Distribución y variación vertical de oxígeno en la campaña oceanográfica FIQUIMBI I.</b>                                                                                                                           | <b>114</b> |
| <b>9.5.1. Distribución vertical de NID y <math>\text{O}_2</math>, en las campañas FIQUIMBI I y FIQUIMBI II.</b>                                                                                                              | <b>118</b> |
| <b>9.5.2. Variabilidad superficial de <math>\text{NO}_3^-</math> en FIQUIMBI I y FIQUIMBI II.</b>                                                                                                                            | <b>120</b> |
| <b>9.6.1. Distribución y variación vertical de pH en la campaña FIQUIMBI II. y distribución de pH a 5 m y AT a 10 m de profundidad en FIQUIMBI I.</b>                                                                        | <b>125</b> |
| <b>9.6.2. Variación vertical de AT (<math>\mu\text{M/kg}</math>) en la campaña FIQUIMBI I y MIMAR V.</b>                                                                                                                     | <b>126</b> |

## LISTA DE TABLAS

| <b>Número de Tabla por Capítulo y Subcapítulo</b>                                                                                                                                                   | <b>Página</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>VIII.1.1</b> Valores de Temperatura y Salinidad en la campaña oceanográfica Tehuanos II.                                                                                                         | <b>30</b>     |
| <b>VIII.1.2.</b> Valores de Temperatura por zona en la campaña oceanográfica Tehuanos II.                                                                                                           | <b>32</b>     |
| <b>VIII.1.3.</b> Valores de Temperaturas por transecto en la campaña oceanográfica Tehuanos II.                                                                                                     | <b>36</b>     |
| <b>VIII.4.1.</b> Concentración de O <sub>2</sub> en la campaña Tehuanos II de 0 – 2,500 m, 0-10 m y valores de UAO calculados por el Ocean Data View (ODV).                                         | <b>45</b>     |
| <b>VIII.4.2.</b> Valores superficiales de UAO (μM/Kg) por horario.                                                                                                                                  | <b>49</b>     |
| <b>VIII.4.3.</b> Concentración de O <sub>2</sub> , por estrato de agua dentro de la columna del GT, en la campaña Tehuanos II.                                                                      | <b>51</b>     |
| <b>VIII.4.4.</b> Valores de UAO calculado por capa de agua y valores de UAO por ODV.                                                                                                                | <b>51</b>     |
| <b>VIII.4.5.</b> Concentración de O <sub>2</sub> en la vertical por zona, en la campaña Tehuanos II.                                                                                                | <b>54</b>     |
| <b>VIII.4.6.</b> Concentración de O <sub>2</sub> de 0-100 m de profundidad en la campaña Tehuanos II.                                                                                               | <b>55</b>     |
| <b>VIII.4.7.</b> Concentración de O <sub>2</sub> y UAO en la vertical de 0-100 m de profundidad, en la campaña Tehuanos II.                                                                         | <b>58</b>     |
| <b>VIII.5.1.</b> Concentración de los iones NO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> y NO <sub>2</sub> <sup>-1</sup> (μM) por estrato de agua en la campaña Tehuanos II.                                       | <b>63</b>     |
| <b>VIII.5.2.</b> Concentración de los iones NO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> y NO <sub>2</sub> <sup>-1</sup> (μM) obtenidos en la columna de agua 0 - 100 m de profundidad, en la campaña Tehuanos II. | <b>64</b>     |
| <b>VIII.6.1.</b> Valores de pH y AT (μM/Kg), obtenidos en la columna de agua 0 - 100 m de profundidad, en la campaña Tehuanos II.                                                                   | <b>70</b>     |
| <b>VIII.6.2.</b> Valores de pH y AT (μM/Kg) por estrato de agua en la campaña Tehuanos II.                                                                                                          | <b>72</b>     |
| <b>IX.1.1</b> Valores de temperatura (°C) en las campañas oceanográficas realizadas entre Mayo de 1989 - Julio de 1992 en el GT.                                                                    | <b>91</b>     |
| <b>IX.2.1</b> Valores de salinidad superficial en las campañas oceanográficas realizadas entre Mayo de 1989 - Julio de 1992 en el GT.                                                               | <b>100</b>    |
| <b>IX.4.1</b> Valores de O <sub>2</sub> (μM) en las campañas oceanográficas realizadas entre Mayo de 1989 - Julio de 1992 en el GT.                                                                 | <b>106</b>    |
| <b>IX.5.1.</b> Valores de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (μM) en las campañas oceanográficas realizadas entre Mayo de 1989 - Julio de 1992 en el GT.                                                  | <b>119</b>    |
| <b>IX.6.1.</b> Valores de pH y AT (μM/Kg) en las campañas oceanográficas realizadas entre Mayo de 1989 - Julio de 1992 en el GT.                                                                    | <b>123</b>    |

## 1. INTRODUCCIÓN

Las aguas tropicales con temperaturas cálidas y salinidades altas, son poco productivas para el desarrollo fitoplancton o zooplancton (Fernández-Álamo y Färber-Lorda, 2006), con poca variabilidad espacio-temporal (Frías-Velasco, 2004), por lo que los cambios estacionales en las comunidades biológicas son más pequeños que en los océanos templados y polares (Fernández-Álamo y Färber-Lorda, 2006).

En el Noreste del Pacífico Tropical (**NETP**) (0°-25°N, 80°-120°W), el desarrollo biológico se encuentra condicionado por características físicas y forzamiento atmosférico (zona de convergencia intertropical, **ITCZ**), surgencias costeras y ecuatoriales, el Domo de Costa Rica y remolinos a gran escala (Romero-Centeno *et al.*, 2007; Sasai *et al.*, 2007).

En el GT, México se producen eventos de viento locales conocidos como **Nortes, Tehuantepecanos o Tehuanos**, procedentes de la región de Alaska y del Noroeste de Canadá, producto de giros atmosféricos anticiclónicos de origen Polar que se mueven hacia el Golfo de México (**GM**). Estos vientos se forman al llevar consigo delante un frente frío atmosférico, separando una masa de aire frío de origen polar de otra masa más homogénea de características tropicales. Estos anticiclones atmosféricos, son centros de alta presión (alrededor de 1032mb) que pueden ser de dos tipos “calientes” y “fríos” (Romero-Centeno y Zavala-Hidalgo, 2003).

En la anticiclogénesis pueden ocurrir dos casos: 1) el anticiclón frío se desvanece mientras se mueve hacia el GM, se desvía hacia el Noreste y se reintensifica conforme se vuelve un anticiclón caliente; 2) los centros de alta presión se mueven hacia el GM, disipándose rápidamente sobre las aguas cálidas, pero sin intensificarse ni desviarse. En ambos casos, el

aire frío se desplaza hacia latitudes más al Sur, llegando a cruzar el Istmo de Tehuantepec (Gallegos-García y Barbarán-Falcón, 1998).

Los Nortes, una vez que llegan al GM, tienen un gradiente de presión a nivel de mar **(SLP)** entre el Sureste del GM (20 °N- 95 °W) y el GT (15 °N-95 °W). Donde la SLP en el GM es más grande que en GT a lo largo del año y la diferencia de presión entre ellos (GM-GT) es mayor en los meses de invierno (Noviembre - Febrero), dando una intensificación de los mismos (Romero-Centeno y Zavala-Hidalgo, 2003).

El promedio mensual de las condiciones de SLP en invierno, muestran un sistema de alta presión sobre el Sureste de los Estados Unidos, que induce un gradiente de presión meridional sobre el Sureste de México, Centro América y el Mar Caribe. Al ser bloqueados por la Sierra Madre con una elevación promedio de 2,000 m, pasan por una discontinuidad que baja drásticamente a los 250 m, a través de una brecha de aproximadamente de 40 Km de amplitud conocida como Paso de Chivela (Romero-Centeno y Zavala-Hidalgo, 2003), una vez que los Nortes han atravesado el Paso de Chivela entonces se les conoce como Tehuanos.

Los Tehuanos aunque no son considerados como vientos geostróficos debido a que su dirección está condicionada por la topografía (Clarke, 1988; Bourassa *et al.*, 1999; Schultz, 1997; Romero-Centeno y Zavala-Hidalgo, 2003) se hacen presentes durante todo el año, siendo más notables durante el invierno boreal (Noviembre-Febrero), mostrando una habitual orientación meridional solo en la costa (Romero-Centeno *et al.*, 2007).

Los Tehuanos en los meses de invierno llegan a exceder los 500 Km de alcance máximo, con velocidades superiores a 25 m/s y pueden durar varias horas por pocos días, con ráfagas por arriba de 30 m/s (Chelton, 2000a,b; Romero-Centeno y Zavala-Hidalgo, 2003; Färber-Lorda *et al.*, 2004).

Los Tehuanos soplan hacia fuera de la costa y producen un corte sobre la superficie del océano que afecta su dinámica, desplazando sus aguas hacia el Sur y compensándola con corrientes de los lados y del fondo, además de causar una mezcla considerable a lo largo del eje del viento que puede originar surgencias y su efecto sobre la superficie oceánica es el descenso abrupto de temperatura, causadas por aguas que emergen de la capa subsuperficial a la superficie (Willett, 1996; Gallegos-García y Barberán-Falcón, 1998), con ello se favorece una alta productividad biológica (Blackburn, 1962; Färber-Lorda, 1994; Fernández-Álamo, 2000; Gonzalez-Silvera *et al.*, 2004; Fernández-Álamo y Färber-Lorda, 2006; Pennington, 2006).

El tiempo de respuesta de la surgencia al viento, es de aproximadamente 36 hrs. (Gallegos-García y Barberán-Falcón, 1998), como consecuencia, se desarrolla un giro anticiclónico, un hundimiento de la piconocline del lado Oeste (Trasviña y Barton, 1997) y remolinos ciclónicos que más tarde se desplazan a largas distancias fuera de la costa, influenciando la productividad biológica de las regiones adyacentes (Gonzalez-Silvera *et al.*, 2004; Fernández-Álamo y Färber-Lorda, 2006).

En el Hemisferio Norte, un remolino ciclónico tiene un sentido de rotación contrario a las manecillas de reloj y cuando el vórtice se desarrolla causa una surgencia (afloramiento o *upwelling*) de aguas más profundas y un hundimiento (*downwelling o sinking*) en sus extremos (<sup>1</sup>).

El afloramiento de aguas más profundas causa un enfriamiento y enriquecimiento de nutrientes para la columna de agua en la zona fótica. Por esta razón, un remolino ciclónico aparece como un remolino frío y principalmente con alta biomasa. Los remolinos anticiclónicos

tienen un comportamiento contrario, apareciendo como un remolino de biomasa baja y principalmente tibios (Müller-Karger y Fuentes-Yaco, 2000; Barton *et al.*, 2009).

La frecuencia de formación y longevidad de los remolinos ciclónicos suele ser más alta a lo reportado, ya que después de que se forma un remolino anticiclónico, por cada uno de ellos en su periferia se generan de 1 a 4 remolinos ciclónicos, indicando su importancia en los cambios energéticos y de material biológico sobre la costa y lejos de ella, un hecho no considerado previamente (Gonzalez-Silvera *et al.*, 2004). La generación de remolinos ciclónicos generalmente se da al Este del meridiano 95°W del GT y pueden durar entre 4 y 30 días.

Los remolinos anticiclónicos ocurren al Este de los 95 °W que corresponde a la región occidental del golfo (Gonzalez-Silvera *et al.*, 2004), con promedio mínimo de vida de 143 días; diámetros de 100 a 400 Km, que pueden viajar 200 Km más allá del margen continental (Palacios y Bograd, 2005). La temporada de remolinos se han observado de 1992 a 2004, un total de 42 remolinos que duró 250 días al año y se formaron 3.5 remolinos por año que empezó en Octubre y terminó a principios de Julio, con una variabilidad estacional de 161 días, empezando tempranamente el 30 de Julio y terminando el 13 de Diciembre (Palacios y Bograd, 2005).

La trayectoria típica de los remolinos anticiclónicos del GT es con dirección Suroeste a lo largo de la línea de costa, mientras los giros anticiclónicos se ven reforzados en la vertical, los giros ciclónicos parecen ser eliminados (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998; Palacios y Bograd, 2005).

El sistema de vientos Nortes, afecta desde Oaxaca México, hasta Panamá. La circulación de las corrientes marinas, producción y biomasa del fitoplancton, abundancia de los organismos en los niveles tróficos superiores hacen del Pacífico Tropical Oriental (**PTO**) un área muy importante desde el punto de vista oceanográfico, para la pesquería, clima y flujos de carbono.

El presente trabajo, reporta los resultados hidrográficos: Temperatura, Salinidad, Oxígeno, Nutrientes ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ), pH y AT, durante la expedición Tehuanos II realizada en el GT en Febrero de 1996 después de un evento Tehuano, asimismo cómo se comparan los resultados con datos históricos en el GT.

## 2. ANTECEDENTES

Las primeras campañas oceanográficas del GT fueron parte del proyecto de investigación del atún aleta amarilla entre 1955 y 1960, Eastern Tropical Pacific Project (**EASTROPIC**) y Scripps Tuna Oceanographic Research (**STOR**) (Brandhorts, 1958; Blackburn, 1962; Crepon, 1982; Emery, 1982). Dieron las primeras evidencias de los Nortes, que indican la presencia de la “cresta” en la termoclina, alineada de Norte a Sur de los 95 °W, con giros anticiclónicos, durante y después de un evento, tanto en la topografía dinámica como en la medición de corrientes, y asocian la ocurrencia de los pulsos de viento con la detección de regiones con agua fría (Trasviña y Barton, 1997).

A partir de la llegada del B/O “El Puma” a la zona del Pacífico, se ha permitido ampliar investigaciones, enfocadas al estudio detallado del fenómeno, abarcando principalmente el aspecto geológico, biológico, físico y químico, siendo éste último el menos desarrollado en esta zona (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

La mayoría de los trabajos sobre el GT, han tenido un enfoque en oceanografía física (Blackburn, 1962; Strong *et al.*, 1972; Stumpf, 1975; Trasviña, 1991; Lavín *et al.*, 1992). En algunos de ellos, se explica el enfriamiento y la formación de los giros, mediante la solución analítica de las ecuaciones de Ekman, reproduciendo el comportamiento básico de la termoclina, en un modelo de dos capas en un océano semi-infinito forzado por una banda de viento, no divergente, perpendicular a la costa; cuyo efecto tiene una distorsión de la interfase, elevada a la izquierda (hacia el Este) y deprimida hacia la derecha (hacia el Oeste) del viento (Crepon, 1982; Trasviña, 1997).

Con el arribo en órbita de sensores de detección satelital, como el Advanced Very High Resolution Radiometer (**AVHRR**) desde 1976 hasta la fecha, Coastal Zone Color Scanner (**CZCS**) (1978-1986), Ocean Color and Temperature Sensor (**OCTS**) (1996-1997) y Sea-viewing Wide Field-of-view Scanner (**SeaWiFS**) (1997-presente) (Lillesand y Kiefer, 1994; Lluch-Cota, 1997; McClain *et al.*, 2002; Frías Velasco, 2004), se ha abierto una línea de investigación denominada Oceanografía Satelital, cuyo propósito es estudiar la física y la biogeoquímica del océano, que han proporcionado información indirecta, tales como el efecto del viento sobre la superficie del mar o el transporte de sedimentos continentales que los ríos descargan en las aguas costeras, estudios sobre los grandes remolinos oceánicos, intensas corrientes costeras, incremento en la turbulencia de flujos de calor, un considerable decremento en la Temperatura Superficial del Mar (**SST**) debido a surgencias y el incremento en la actividad biológica asociados a los niveles de concentración de clorofilas (Owen y Zeitzschel.,1970; Lluch-Cota, 1995) y composición fitoplanctónica y sus variaciones (Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993).

La influencia de los Tehuanos en los procesos locales sobre las aguas adyacentes del Pacífico, como la generación de grandes remolinos oceánicos, intensas corrientes costeras, incremento en la turbulencia de flujos de calor, un considerable decremento en la SST debido a surgencias y el incremento en la actividad biológica, han sido motivo de muchos estudios con especial enfoque sobre el Golfo de Tehuantepec (Roden, 1961; Stumpf, 1975; Stumpf y Legekis, 1977; Alvarez *et al.*, 1989; McCreary *et al.*, 1989; Lavín *et al.*, 1992; Barton *et al.*, 1993; Trasviña *et al.*, 1995; Lluch Cota, 1995; Lluch-Cota *et al.*, 1997; Schultz *et al.*, 1998; Steenburgh *et al.*, 1998; Bourassa *et al.*, 1999; Muller- Karger *et al.*, 2000; Zamudio *et al.*, 2006).

Existen escasos estudios *in situ* del GT. La campaña Tehuanos I (9 de Enero a 10 de Febrero de 1989), es el proyecto de investigación antecesor a la campaña Tehuanos II, con vinculación internacional, lo que permitió obtener más parámetros analizados y completos que ofrecieron ampliar la información sobre dicho evento, específicamente en la descripción de la dinámica costera, incluyendo el análisis de la generación y propagación de los giros anticiclónicos a partir de los sensores remotos. Permitted que se dieran nuevos enfoques sobre el nivel de respuesta del GT ante un Tehuano (Trasviña, 1995; Trasviña y Barton, 1997).

Información sobre la descripción de los parámetros químicos *in situ*, solamente se tienen conocimiento del reporte de Vázquez-Gutiérrez *et al.*, (1998); el cual presenta los datos fisicoquímicos obtenidos por el Laboratorio de Fisicoquímica del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM, de las campañas oceanográficas hechas entre Mayo de 1989 y Julio de 1992 [MIMAR V (Mayo 1989); FIQUIMBI I (Noviembre,1989); FIQUIMBI II (Julio,1992); SALCRU I (Agosto,1990) y SALCRU II (Noviembre,1990)].

En la campaña Tehuanos II (Febrero 1996), se tiene conocimiento dos informes técnicos:

1) Se presentan datos de abundancia del fitoplancton de la región del GT, colectados a bordo del Buque Oceanográfico **(B/O) Altair** de la Secretaria de Marina. Seleccionaron nueve estaciones hidrográficas, tomaron muestras para el análisis del fitoplancton total y de los grupos más importantes (diatomeas, dinoflagelados, flagelados y ciliados). Los muestreos se hicieron cercanos al medio día ya que fueron complementarios a los experimentos de productividad primaria realizados durante la misma campaña oceanográfica. Las muestras colectadas fueron entre 0 y 10 m de profundidad. Los análisis los realizaron por el método de

Uthermol (1958). Los cálculos finales de abundancia de fitoplancton se hicieron de acuerdo con el método reportado por Nájera (1992). Las abundancias del fitoplancton total fueron más altas en las estaciones localizadas en la parte central, las menores se determinaron en las estaciones cercanas a la costa y hacia los extremos oeste y este del Golfo. La mayor contribución del fitoplancton total fue por las diatomeas. La zona costera estuvo principalmente representada por diatomeas céntricas (el 79% del fitoplancton total), la zona centro fuera de la costa predominaron las diatomeas penadas (el 95% del fitoplancton total), la mayor abundancia de dinoflagelados fueron sin teca, algunos de ellos no identificados por ser especies muy pequeñas ( $<10\ \mu\text{m}$ ). Las abundancias de los flagelados fueron del mismo orden de magnitud que las diatomeas y coincidieron con las abundancias menores de diatomeas y dinoflagelados. La abundancia de los ciliados fueron de un orden menor de los dinoflagelados y su contribución fue muy baja al fitoplancton total. Las especies de diatomeas características de la zona centro del GT, lo conformaron *Chaetoceros* y *Nitzschia*, *Hemialius spp.*, *Thalassiosira sp.*, *Rhizosolenia sp* y *Guinardia sp* (Nájera-Martínez *et al.*, 1997).

2) Se obtuvo la variabilidad espacial de la productividad primaria, con mediciones de un perfilador (PNF-300, Biospherical Instruments) que cuantificó la fluorescencia de clorofila *a* ( $\text{Lo}_{685}$ ) o fluorescencia natural del fitoplancton, solo para nueve de las estaciones costeras y oceánicas que cubrieron las condiciones oceanográficas del GT durante un Tehuano. Las concentraciones de clorofila *a* tuvieron valores superficiales de 0.3 y 2.5  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Las más bajas concentraciones se localizaron fuera de la parte central del Golfo hacia el Este y Oeste. Las concentraciones de clorofila durante el invierno mostraron condiciones oligotróficas y mesotróficas. En la parte central del Golfo estuvieron los más altos valores de biomasa

fitoplanctónica, asociados con menores temperaturas superficiales. Los valores máximos de PP estuvieron dentro del orden reportado durante invierno por otros autores y estuvieron siempre asociados al máximo de clorofila *a*, excepto en algunas estaciones donde encontraron un desfase en la vertical (Nájera-Martínez y Gaxiola-Castro, 2000).

El proceso de subducción que acompaña la frontera del giro cálido y el parche de agua fría originado por los tehuanos, se presenta como evidencia observacional de la existencia de dos lentes (giros) analizados de las campañas Tehuanos I y Tehuanos II, y se confirma mediante argumentos cualitativos (observaciones del flujo y del campo de densidad) y mediante argumentos de vorticidad. La subducción se inicia por procesos intensos de convergencia donde el chorro cálido desprendido de la costa Oeste del Golfo, alcanza el Golfo central, choca con el agua fría y se generan frentes intensos de densidad. (Trasviña *et al.*, 2003).

La estructura y variabilidad de la circulación costera en el GT (Tehuano I y II), detalla la naturaleza, magnitud y extensión del tiempo invernal del flujo costero y su relación con la **Corriente Costera de Costa Rica (CCCR)** (Barton *et al.*, 2009).

### **3. JUSTIFICACIÓN**

- El mayor número de investigaciones sobre el evento ha recaído a partir de la observación satelital, dejando a un lado el análisis o corroboración de los mismos, a través de datos obtenidos durante expediciones oceanográficas.
- Existen escasos reportes en los que se estiman los niveles de concentración y distribución de los parámetros químicos a un nivel local, ante la presencia de factores que modifican la hidrología del océano gran parte del año, como es en el caso de GT por los Tehuanos y se han reportado de forma general para las aguas Tropicales del Océano Pacífico.

### **4. OBJETIVOS**

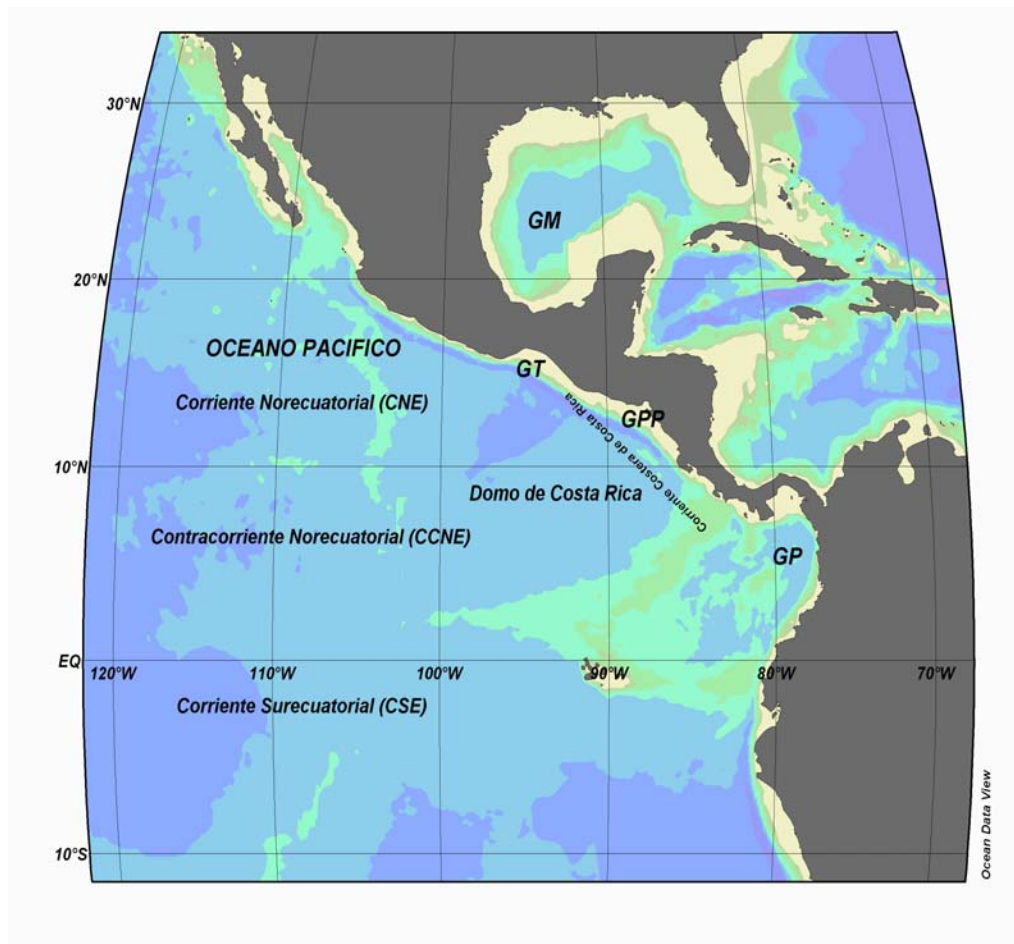
- Caracterizar la distribución de los parámetros físico-químicos, obtenidos después del Tehuano en Febrero de 1996.
- Comparar el efecto de diferentes Tehuanos sobre los parámetros hidrográficos.

### **5. HIPÓTESIS.**

- Algunos parámetros químicos son modificados después de un Tehuano en el Golfo de Tehuantepec.

## 6. ÁREA DE ESTUDIO

El GT se encuentra dentro de la región del PTO (20°N, 20°S y 160°W, 70°W) (Fig.6.1), entre los paralelos 14°50', 16°00' N y 92°09', 96°40' W, entre las costas de Puerto Ángel, Oaxaca y Puerto Madero, Chiapas. Este es el estrecho continental entre el GM y el Océano Pacífico que separa la Sierra de Chiapas de la Sierra Madre del Sur por el Paso de Chivela (Popoca-Arellano, 2003).



**Figura.6.1.** Mapa de la zona del Pacífico Tropical Oriental, sobre la cual se encuentra el área de estudio. Golfo de Tehuantepec (GT); Golfo de México (GM); Golfo de Papagayo (GPP) y GP es el Golfo de Panamá.

## 6.1 Características Oceanográficas

Las características hidrográficas que se presentan en el PTO influyen en la dinámica del GT. Algunas de ellas son:

- la presencia de la lengüeta fría ecuatorial; región caracterizada por bajas SST que se extiende hacia el Oeste de las costas de Sur América dentro del Pacífico Central,
- piscina cálida del Pacífico Oriental; localizada al Oeste de las costa Sur de México y América Central, caracterizada por temperaturas subsuperficiales del mar (**SSTs**) cálidas ( $>27^{\circ}\text{C}$ ) y que relativamente es una zona con vientos débiles, separada de la lengüeta fría del ecuador por una SST frontal que es una región tropical importante donde se desarrollan ciclones (Romero-Centeno *et al.*, 2007).
- la ITCZ, localizada ligeramente al Norte del Ecuador, región que mantiene bajas presiones y alta nubosidad, debido a la constante elevación de aire húmedo cálido, que provoca variaciones estacionales en su desplazamiento a consecuencia de los vientos alisios, determina la distribución de los patrones de lluvias por la poca cobertura latitudinal de la banda (Frías-Velasco, 2004); región donde las entradas del Sur y del Norte convergen (Romero-Centeno *et al.*, 2007).

Las corrientes marinas que se presentan en el GT, se forman de la dinámica del PTO, en donde las aguas superficiales y las corrientes al interactuar fuertemente con los vientos alisios se dirigen hacia el W en las Corrientes Norecuatorial (**CNE**) y Surecuatorial (**CSE**), siendo la CNE más débil con velocidades de 20 cm/s, en comparación con la CSE que es más rápida con velocidades de hasta 100 cm/s (Rodríguez-Rubio y Stuardo, 2002; Frías-Velasco, 2004). El

transporte resultante provoca una pendiente negativa del nivel del mar de E a W a lo largo de todo el Pacífico Tropical. En la ITZC que es donde convergen los dos cinturones de los vientos alisios provenientes del Pacífico Norecuatorial (**PNE**) y de Pacífico Sur-Ecuatorial (**PSE**), la fuerza de gradiente de presión hacia el E es mayor que la del gradiente hacia el W, y por balance geostrófico se genera la Contracorriente Norecuatorial (**CCNE**) o Contracorriente Ecuatorial (**CCE**) (Fiedler, 1992; Molina-Cruz y Martínez-López, 1994; Lluch-Cota, 1995) que fluye hacia el E entre la CNE y la CSE con una velocidad de 50 cm/s (Frías-Velasco, 2004).

En invierno y primavera, los vientos alisios del Noreste son intensos y su máxima velocidad se encuentra en su posición más al Sur 9°N. Por lo cual la ITCZ, se encuentra prácticamente en el Ecuador (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998) y las corrientes que se hacen presentes dentro del GT, se suceden de la siguiente manera:

- La corriente de California es normalmente desviada hacia el Oeste antes de los 20°N, sin embargo se llega a presentar en condiciones invernales extremas, tan al sur en el GT (Wyrtki, 1967; Lluch-Cota, 1995). La incursión de esta agua, es solo en capas subsuperficiales y en la parte Oeste del GT, aproximadamente a 95°W donde se encuentra con aguas provenientes de las surgencias y forman un frente oceánico, además de conformarse como el principal aporte a la CNE (Molina-Cruz y Martínez-López, 1994; Lluch-Cota, 1995; Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).
- La CCNE se encuentra sumamente debilitada, debido a que los vientos alisios van en sentido contrario a ella y no alcanza las costas de América (Lluch-Cota, 1995).
- La CCCR se desvía hacia el Oeste debido a que los vientos alisios soplan del Noreste, esta desviación es sustentada por un flujo hacia el Sur, producto de los Tehuanos (Molina-Cruz

y Martínez-López, 1994; Monreal-Gómez y Salas de León, 1998). En este momento, las características del Pacífico Tropical Mexicano se encuentran determinadas por los eventos locales de viento, calentamiento solar y lluvia (Trasviña, 1991; Lluch-Cota, 1995).

En verano y otoño, la velocidad máxima de los vientos alisios del Noreste se encuentra a los 18°N. Por lo tanto a ITCZ se localiza en su posición más al Norte y:

- La CCE se encuentra muy intensa, presenta un flujo que alcanza los 90°W, definiendo el Domo de Costa Rica, sitio en donde se une con la CCCR, para dar un giro y ser ambas masas de agua quienes alimenten la CNE, entre 10-20°N (Lluch-Cota, 1997; Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).
- La Corriente de California se desvía hacia el Oeste en las proximidades de la punta de la Península de Baja California, debido a que los alisios en esta temporada tienen entradas más hacia al Norte (Lluch-Cota, 1997; Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).

## **6.2 Variabilidad de las corrientes marinas y los Tehuanos en el lapso del año.**

Los Tehuanos, durante invierno, se llegan a fusionar con los reactores de viento originados en el borde de Costa Rica-Nicaragua, una vez que estos se extienden más al Sur del GT, se ven reforzados por las entradas de los vientos Alisios provenientes del PNE que son más intensos durante el invierno y PSE que son intensos durante el verano, ambos sistemas de viento se caracterizan por ser sistemas de alta presión, los cuales convergen al Norte del Ecuador entre los 5-10°N en la ITCZ, donde los vientos Alisios son más débiles (calmas ecuatoriales) y retornan hacia el Oeste después de dejar la costa (Frías Velasco, 2004; Romero-Centeno *et al.*, 2007).

En Marzo, los Tehuanos ya empiezan a decrecer sus velocidades, teniendo que para Mayo, los parámetros de orientación empiezan a cambiar, las entradas provenientes del Sur se intensifican y ligeramente retornan al Este, alrededor de los 3-7°N y al Este aproximadamente a los 110°W; mientras que los vientos hacia el Oeste cubren un área del Norte de aproximadamente 8°N (Romero-Centeno *et al.*, 2007; Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).

En Junio, las entradas del Norte son relativamente débiles y las entradas del Sur guardan una intensificación que penetran hacia el Oeste. Los vientos ligeros del Norte provenientes de alrededor de 10°N, cambian de dirección dirigiéndose al Este hacia aproximadamente los 115°W. Estos parámetros de circulación favorecen un transporte húmedo dentro del continente, coincidiendo con las primeras máximas precipitaciones observadas en la región central del Sureste de México y Centro América (Romero-Centeno *et al.*, 2007).

En Julio–Agosto y aunque son menos intensos, se observa un ligero reforzamiento en los jets de viento para Tehuantepec y Papagayo, en una circulación media-baja para la región central de NETP, mostrando nuevamente una orientación hacia el Oeste (Romero-Centeno *et al.*, 2007). Esta ligera intensificación, al menos para el GT se atribuye a la diferencia de presión de nivel medía del mar entre el Océano Atlántico Occidental y el Pacífico Oriental que puede ser causado por una extensión e intensificación hacia el Oeste a mediados de verano por parte de las altas presiones de Azores–Bermudas (Romero-Centeno y Zavala-Hidalgo, 2003). Este reforzamiento esta sincronizado con la reducción de la actividad de tormentas tropicales en el Caribe y zonas más alejas del Pacífico oriental y con la sequía de a mediados de verano en el Sureste de México y Centro América, un fenómeno climatológico único que se da en el Hemisferio Oeste, donde las cantidades de precipitación se reducen en un 40% a finales de

Julio y principios de Agosto, comparado con Junio y Septiembre (Romero-Centeno *et al.*, 2007; Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).

En Septiembre los parámetros de viento cambian abruptamente, la precipitación incrementa nuevamente en la región, cuando los segundos máximos son observados. En Octubre, los parámetros de circulación del viento empiezan a debilitarse dando el aumento en el observado durante invierno y primavera (Romero-Centeno *et al.*, 2007).

### **6.3 Hidrología**

La distribución de temperatura superficial en el océano Pacífico Tropical muestra valores entre 27°C y 29°C del centro de México hasta Panamá; del centro de México hacia el Norte, la SST disminuye gradualmente hasta aproximadamente 17°C al Norte de Baja California, de Panamá hasta el Norte de Perú, la temperatura se encuentra entre 25°C y 27°C, de los 30°S hacia el Sur, la temperatura del mar disminuye de forma gradual de 16°C hasta 8°C en el extremo Sur de Chile (<sup>2</sup>).

La salinidad media del agua del mar es de 35, con ligeras variaciones entre un océano y otro. En los mares del Hemisferio Norte se encuentra menor salinidad que en el Sur, debido a que los continentes están más próximos y tienen mayor escurrimiento de agua dulce que los del Sur, pero tomando en cuenta el promedio de cada océano, se tiene que en el Pacífico es de 34.62, en el Índico 34.76 y finalmente, en el Atlántico es de 34.90. De aquí que, por regla general, se presente una mayor salinidad en las zonas tropicales que en las de latitud elevada (Cifuentes-Lemus *et al.*, 1997).

## **6.4 Eventos interanuales**

El GT se ha visto influenciado por eventos interanuales como la Oscilación del Sureste-El Niño, y La Niña que afectan al Pacífico Tropical y que impactan sobre la variabilidad de los vientos Tehuanos. El promedio de los vientos Nortes en los años La Niña (1964, 1967, 1970, 1971, 1973, 1975 y 1988) han sido significativamente más bajos que en años neutrales (1966, 1968, 1974, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1983, 1984, 1985, 1989, 1990, 1992-95) y en años El Niño (1965, 1969, 1972, 1976, 1982, 1986, 1987 y 1991), donde su frecuencia fue menor. En los años El Niño el promedio de las velocidades de los vientos para Abril-Mayo y Agosto-Octubre fueron mayores que en años neutrales sin que mostrara una significativa diferencia de ocurrencia de los vientos comparado con los años neutrales, excepto en los meses de Mayo y Septiembre, aun así encontró que el número de Nortes incrementó a comparación con los años La Niña (Romero-Centeno y Zavala-Hidalgo, 2003).

## **6.5 Características económicas**

La parte central del GT, en la actualidad representa un fuerte foco de desarrollo económico y social, resultado de la actividad petrolera derivada de la refinería “Antonio Dovalí Jaime”. Esto le ha dado una gran importancia estratégica a la ciudad de Salina Cruz, ya que su puerto constituye el canal de conexión entre la producción de petróleo del Golfo de México y su distribución hacia los países de la cuenca del Pacífico, razón por la cual este puerto es el más importante en la región del Pacífico Sur de México. Además de ser un puerto industrial es un puerto pesquero, cuya actividad se dirige en la producción de camarón, conformando en conjunto con el estado de Chiapas, el 4º lugar en producción de camarón a escala nacional, y debido a la alta productividad que presenta el golfo constituye una zona donde convergen el

desove y la crianza para los estados larvales de muchos peces de importancia comercial, como son el atún, sardina, anchoveta, calamar, principalmente; algunas de ellas sustentadas por la presencia de fitoplancton como inicio de la cadena trófica y otras por la cadena de detritos (Tapia-García y Gutiérrez-Díaz *et al.*, 1998).

## **7 METODOLOGÍA**

### **7.1 Campaña Tehuanos II.**

La campaña oceanográfica Tehuanos II, inició el 10 de Febrero de 1996, durante la temporada de Nortes en los Golfos de Tehuantepec y Papagayo. Participaron los B/O “Francisco. Ulloa”, propiedad del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, BC., México (**CICESE**); el B/O “Altaír”, propiedad de la Armada de México y el B/O “Solidaridad” propiedad del Instituto Nacional de Aprendizaje de Costa Rica. El estudio incluyó la caracterización del campo de corrientes superficiales, mediante un perfilador acústico de corrientes; se liberaron 24 flotadores ARGOS seguidos con satélite, 15 en Tehuantepec del B/O “Ulloa” y 9 en Golfo de Papagayo del B/O “Solidaridad”. El seguimiento de los flotadores corrió a cargo de Peter Niiler (Global Drifter Program), por un período de tres meses (Bustos-Serrano, 1996).

El plan de trabajo en el GT a bordo del B/O Ulloa y Altaír, fue el de hacer observaciones de radar para obtener parámetros de oleaje que en conjunto con imágenes del satélite ERS-2 (SAR) servirían para determinar la influencia del oleaje en la mezcla vertical, se observarían las ondas internas mediante dos anclajes de termistores (SBE-16) en la costa y específicamente por parte del El B/O “Altaír” recorrió las costa del GT haciendo mediciones del campo de masa para determinar las corrientes geostróficas a lo largo de la plataforma y talud continental, al igual que coleccionar mediciones de nutrientes, productividad primaria y biomasa de zooplancton (Bustos-Serrano, 1996).

El muestreo del 10 al 15 de Febrero se realizó durante la etapa de gestación de un Tehuano, la reintensificación del viento obligó a la embarcación regresar al Puerto de Salina Cruz, permitiendo reiniciar la expedición a partir del 16 de Febrero. Este trabajo conjunta los datos obtenidos del B/O “Altaír” del 16 al 27 de Febrero, por lo que se considera que son muestreos después de un Tehuano. Se realizaron 10 transectos, con 196 lances hidrológicos, de los cuales, 90 fueron para la red de estaciones de Tehuanos II; 6 para la hidrografía donde se colocaron las boyas Argos y 100 para el experimento de Ondas Internas (Bustos-Serrano, 1996).

## **7.2 Colecta de muestras y técnicas de análisis.**

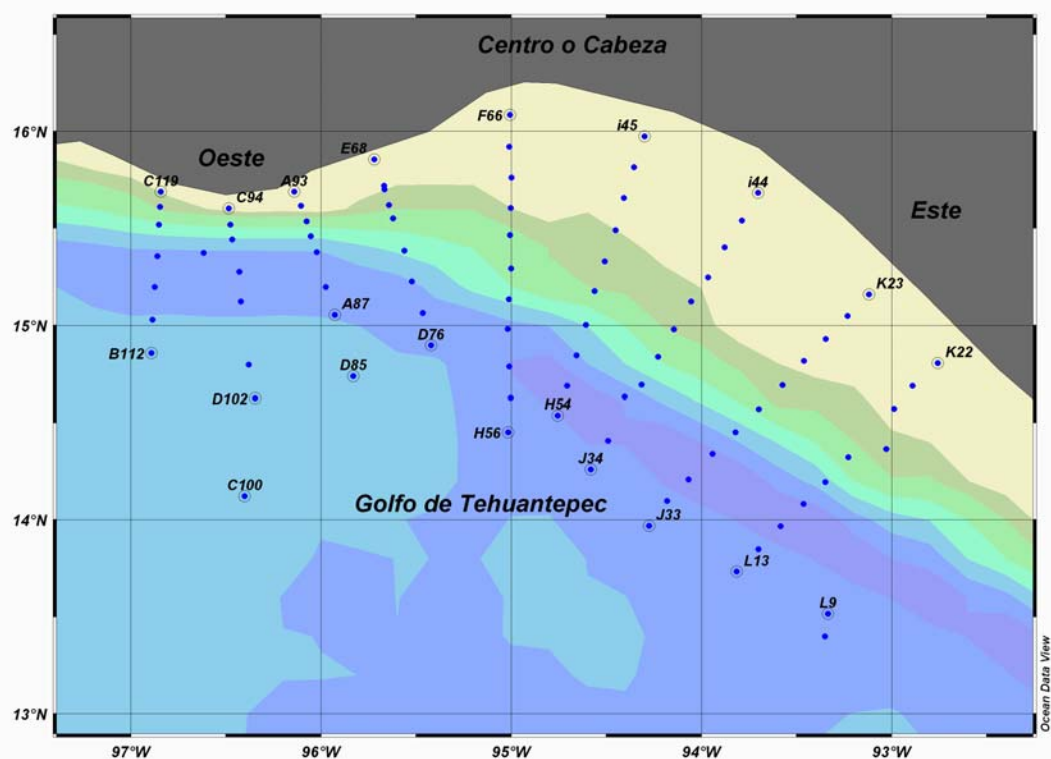
Se obtuvieron los datos de Temperatura y Salinidad, a partir de los sensores de Conductividad-Temperatura-Profundidad (CTD) SBE Modelo 25; se colectaron las muestras de agua con botellas Niskin de 5L, a 5 niveles (20, 50, 100, 500 y 2500 m) en los 90 lances por estaciones generando un total de 450 muestras.

Los análisis realizados a bordo fueron de: Oxígeno disuelto, potencial de Hidrógeno (**pH**), Nitritos y Nitratos (**NO<sub>2</sub><sup>-</sup>**, **NO<sub>3</sub><sup>-</sup>**). El primero se colectó la muestra en botellas Winkler y analizó de acuerdo al método Winkler (Strickland y Parsons, 1972). El pH fue analizado con un potenciómetro Radiometer Copenhagen Modelo PM-83 y un electrodo de vidrio Fisher Brand, calibrado con soluciones amortiguadoras Tris-Marinos de pH=8.875 y pH=7.458, teniendo una precisión de 0.01. Los NO<sub>2</sub><sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se analizaron en el Laboratorio Analítico de la Universidad de California en Santa Bárbara, con la técnica colorimétrica en un sistema de flujo continuo Lachat Instrument, modelo Quickchem 8000.

### 7.3 Procesamiento datos.

El procesamiento de datos consistió en conformar una base de datos, se realizó estadística descriptiva (promedios, análisis de correlación y regresión lineal entre variables hidrológicas). El graficado se realizó con la ayuda de programas de visualización oceanográfica como el ODV y Sigma Plot®.

El B/O Altair realizó una malla de estaciones de 10 transectos, que inicio la numeración de los mismos en referencia a la zona en donde se inició la campaña Tehuanos II; el transecto 1 correspondió el primero en la zona Oeste y así sucesivamente hacia el Este el último comprende solo dos estaciones (Fig.7.1).



**Figura.7.1.** Ubicación de los transectos y estaciones muestreadas durante Tehuanos II. Se muestra el inicio y final de cada transecto, enumerados de A–L.

La división del GT por zonas, fueron definidas de acuerdo a la ubicación de los transectos muestreados. La zona Oeste está conformada por los primeros tres transectos (A93-C119); la zona Centro abarca los transectos 4-7 (D76-i45) y la zona Este ubica los transectos 8-10 (J33-L9).

#### **7.4 Análisis de datos.**

Los gráficos de distribución se realizaron de acuerdo al análisis requerido de las característica que presenta cada variable, sin embargo, se graficó de manera general la distribución sobre la superficie y en la vertical, en este último se hicieron cortes de hasta 100 m de profundidad, para acentuar la distribución que tienen los valores de cada variable en los diferentes niveles muestreados, ya que la mayoría de los valores utilizados en la comparación se refieren a aquellos encontrados en la zona eutrófica del océano que comprende de 0 a 100 m de profundidad.

##### **7.4.1 Temperatura.**

El análisis de la temperatura en la vertical, se consideró por zona y por transecto. El análisis por zona comprendió la descripción de la temperatura en base a la estadística descriptiva resultante de conjuntar los datos de los transectos correspondientes a cada zona.

La variabilidad de la termoclina por zona fue analizada al considerar los 18°C marcados como la base de la termoclina promedio anual encontrada durante Tehuanos I (1989), antes de un evento Tehuano (Trasviña y Barton, 1997).

El análisis de la temperatura en la vertical por transecto se efectuó por zonas (Oeste, Centro y Este), y comprendió la descripción del 3º, correspondiente a la zona Oeste, el cual fue el primer transecto realizado a la llegada de la campaña; el 5º en la zona Centro, lugar donde recayó el Tehuano y por último, el transecto 9º en la zona Este que correspondió al último completo realizado durante la campaña.

La termoclina estacional del GT durante Tehuanos II, se dedujo considerando una capa homogénea de 20°-31°C, tomando en cuenta que la termoclina, permanente en el GT es somera y homogénea durante la época de “no Tehuanos”, por lo que un cambio abrupto de la temperatura indicó la primer termoclina estacional durante Tehuanos II

La homogeneidad de la capa de mezcla en el GT, se dedujo considerando que las temperatura mínimas superficial de las aguas tropicales son de 20°C (Cifuentes Lemus *et al.*, 2003), el máximo superficial de 31°C medido durante la campaña SALCRU I (Agosto de 1990) y SALCRU II (noviembre de 1990); y tomando en cuenta que la temperatura mínima superficial durante la época secas es de 26.5°C (campaña MIMAR V, Mayo, 1989) (Vázquez Gutiérrez *et al.*, 1998).

En Tehuanos I (Trasviña y Barton, 1997), determinaron el área entre las isotermas de 16° y 18°C para destacar el centro de la termoclina, sin mencionar las consideraciones por las cuales así lo hacen. Para comparar la variabilidad de la termoclina de Tehuanos II y Tehuanos I, se decidió compactar las isotermas de 18° y 21°C. La isoterma de 18°C en base a la temperatura que delimitó la capa de mezcla (50 m de profundidad) encontrada durante Tehuanos I y la isoterma de 21°C, al considerar el promedio entre las temperaturas mínimas por cada zona de la primer termoclina a los 20 m encontrada durante Tehuanos II.

#### 7.4.2 Oxígeno Disuelto.

Las imágenes de oxígeno sobre la superficie, fueron realizadas en base a dos unidades de concentración: la primera en  $\mu\text{M}$  fue usada como imagen de comparación con respecto con otras campañas oceanográficas, ya que en éstas la concentración de oxígeno fue reportado en  $\mu\text{M}$ ; la segunda imagen es en unidades de  $\mu\text{M}/\text{kg}$  y fue realizada para referencia con respecto a la imagen de UAO, cuyas unidades de concentración por el programa ODV han sido calculadas en  $\mu\text{M}/\text{kg}$ .

El análisis de oxígeno por horario, se definió con el objetivo de respaldar el análisis sobre la superficie del GT y determinar el horario y ubicación de las zonas donde se estaba dando un uso o producción de oxígeno. Para tal objetivo se separaron aquellas estaciones muestreadas durante la madrugada (0:00-06:00 hrs.), día (06:00-12:00 hrs.), tarde (12-19:00 hrs.) y noche (19:00-24 hrs.) y se analizó el Uso Aparente de Oxígeno (**UAO**) por separado.

El UAO da valores negativos y positivos, por lo que en el análisis por horario esto denota una misma diferencia significativa en un mismo horario, por lo que los datos fueron separados de acuerdo al signo. Se obtuvo el promedio de cada conjunto de datos y la diferencia entre ambos promedios dio la producción (negativo) o consumo (positivo) del oxígeno.

La concentración de UAO, para el estrato o capa de agua superficial que comprende de 0-10 m de profundidad y la capa de agua de 20 m., se calculó con el programa ODV y para verificar la confiabilidad; la UAO fue calculada considerando las capas como un sistema en caja, conjuntando sus características en un promedio. Para la capa de agua superficial se consideró

una temperatura promedio de 25°C y salinidad de 34; para la capa de 20 m de profundidad, una temperatura de 24°C y 34 de salinidad.

La descripción del oxígeno en la vertical, comprende los mismos transectos de la zona Oeste y Centro descritos para la temperatura. En la zona Este del Golfo, el transecto 8 fue el analizado, ya que comprendió estaciones ubicadas dentro del parche de marea roja, localizado durante la campaña.

El análisis en la vertical del oxígeno comprende la descripción del estrato de agua que marca el inicio de la zona mínima de oxígeno limitado por concentraciones  $<200\mu\text{M/Kg}$  que marcan el descenso de oxígeno y concentraciones  $>100\mu\text{M/Kg}$  marcados por la diferencia entre las concentraciones de la capa de 20 m con respecto a las concentraciones de los 50 m de profundidad.

#### **7.4.3 NID ( $\text{NO}_3^-$ y $\text{NO}_2^-$ ).**

La distribución vertical de NID, además de hacer su perfil, también se graficó visualizando su ubicación en la horizontal a distintas profundidades, ya que a diferencia de las demás variables, los máximos valores de concentración de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$ , no se ubicaron sobre la superficie del GT, así que se decidió comparar entre una y otra variable, para saber la localización de los valores máximos encontrados durante la campaña Tehuanos II.

#### **7.4.4 pH y AT.**

Las correlaciones pH—temperatura y pH—salinidad, han sido fundamentadas tras la sugerencia que el pH es mejor indicador de surgencia que la temperatura y la salinidad,

distinguiendo entre tipos de agua con diferentes historias biológicas y físicas, a través de la relación pH-densidad (Hernández-Ayón *et al.*, 2003).

El Dióxido de Carbono Total (**TCO<sub>2</sub>**) fue calculado por un programa diseñado en EXCELL WINDOWS por Lewis y Wallace (1998), en el que se introdujeron los datos de las variables de Temperatura (°C), Salinidad y AT (μM/Kg).

## **7.5 Descripción de resultados.**

La descripción de los resultados se formuló con base en comparaciones entre las campañas oceanográficas Tehuanos I (9 de Enero al 10 de Febrero de 1989), MIMAR V (Mayo 1989); FIQUIMBI I (Noviembre, 1989); FIQUIMBI II (Julio, 1992); SALCRU I (Agosto, 1990) y SALCRU II (Noviembre, 1990), justificándose con la estadística básica descriptiva, calculada a partir de los datos del Tehuanos II.

La comparación principal en la sección de hidrología se realizó con Tehuanos I, que fue la campaña antecesora con colaboración internacional y que aportó un mayor número de parámetros medidos. El comportamiento del GT se puede describir mejor si se considera antes, durante y después de un Tehuano. La descripción en la horizontal y vertical, permitió que los resultados generados durante Tehuanos II, tengan una base de justificación mas reciente y se complementen con los de Tehuanos I.

En la primera sección del análisis hidrológico en GT, se hacen comparaciones de datos obtenidos de imágenes satelitales contra la imagen compuesta a partir de los resultados *in situ*.

Para cumplir éste objetivo se armó una secuencia de imágenes adquiridas de distintas publicaciones y autores.

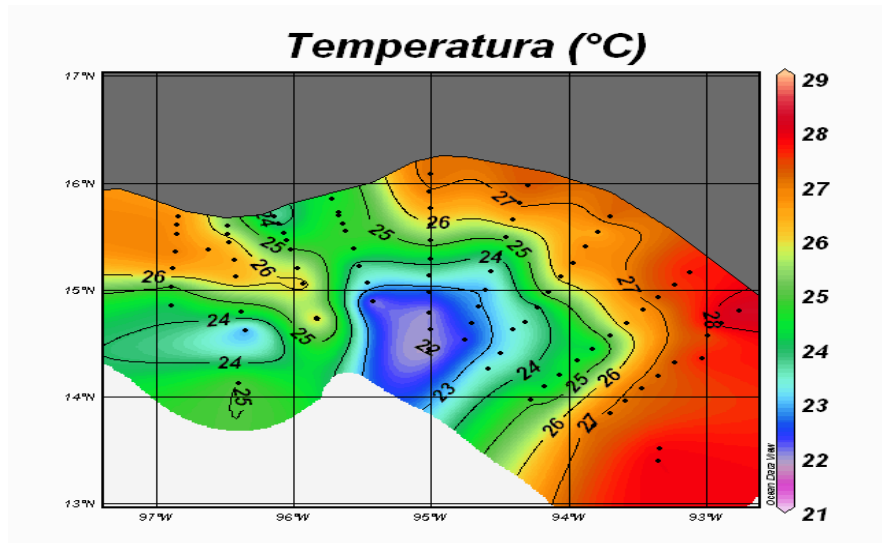
Las imágenes de satélite de la campaña Tehuanos I, fueron tomadas el 17 y 20 de Enero del mismo año y muestran el remanente de un evento anterior del 21 de Enero; fueron tomadas de Barton *et al.*, (2009) y Trasviña Castro<sup>3</sup>. Para la expedición Tehuanos II (10 al 27 de Febrero de 1996), las imágenes son durante y después del Tehuano, tomadas de Barton *et al.*, (2009). En ambas campañas las imágenes fueron capturadas por el satélite AVHRR.

## 8. RESULTADOS

### 8.1 Temperatura

#### 8.1.1 Distribución en la Horizontal

La respuesta de océano ante la presencia del Tehuano de Febrero de 1996, mostró una clara división sobre la temperatura superficial del GT, limitada por una franja de agua fría que se extendió a partir de los 96° - 96.5°W de la cabeza del Golfo (Fig.8.1.1).



**Figura.8.1.1.** Distribución de la temperatura superficial *in situ* (°C), obtenidas después del Tehuano durante la campaña oceanografía Tehuanos II (16-27 de Febrero de 1996).

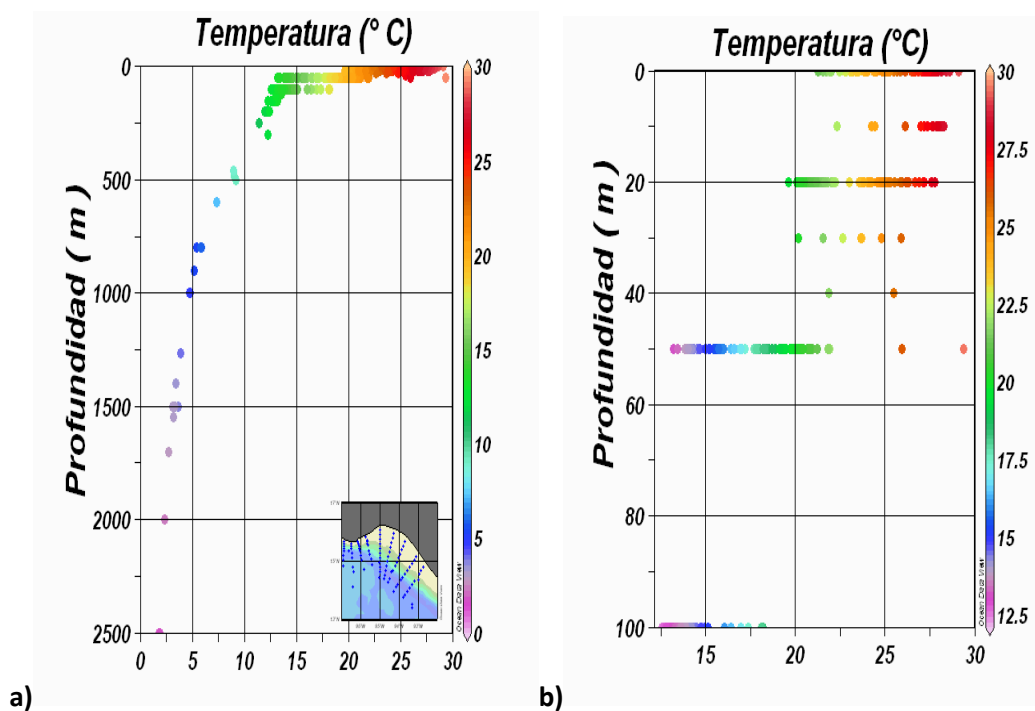
La franja de agua fría se delimitó de las aguas adyacentes propias del GT, por las temperaturas que encerró la isoterma de 25°C, que se consideró no solo por lo que muestra la imagen a color que separa el agua fría de la cálida (Fig.8.1.1), sino también por que el promedio resultante de la temperatura superficial *in situ* fue 25.49°C (Tab.VIII.1.1a). Estos datos indicaron dentro de la franja de agua fría temperaturas de 21° a 25°C, mientras que fuera de ella en la zona Este se hallaron las temperaturas máximas superficiales de 26° a 29.12°C, en la zona Oeste las temperaturas registradas fueron de 26° a 27.71°C (Fig.8.1.1; Tab.VIII.1.2b y c).

**Tabla.VIII.1.1** Valores de; **a)** Temperatura y **b)** Salinidad; para cada estrato dentro de la columna de agua muestreada en el GT durante la campaña oceanográfica Tehuanos II.

| Profundidad<br>(m) | a) TEMPERATURA ( °C ) |        |          | b) SALINIDAD |        |          |
|--------------------|-----------------------|--------|----------|--------------|--------|----------|
|                    | Máximo                | Mínimo | Promedio | Máximo       | Mínimo | Promedio |
| <b>0</b>           | 29.120                | 21.246 | 25.496   | 34.590       | 33.046 | 34.121   |
| <b>20</b>          | 27.780                | 19.617 | 23.076   | 34.631       | 33.626 | 34.249   |
| <b>50</b>          | 21.928                | 13.204 | 17.311   | 34.893       | 34.010 | 34.614   |
| <b>100</b>         | 18.210                | 12.540 | 13.802   | 34.870       | 34.544 | 34.818   |
| <b>500-1000</b>    | 9.196                 | 4.752  | 6.828    | 34.654       | 34.566 | 34.598   |
| <b>1500</b>        | 3.624                 | 3.084  | 3.218    | 34.618       | 34.010 | 34.580   |
| <b>2500</b>        | 2.759                 | 1.834  | 2.055    | 34.684       | 34.635 | 34.671   |

### 8.1.2 Perfil ó Distribución Vertical.

La temperatura en la vertical siguió un comportamiento típico de distribución, conforme la profundidad aumenta penetran menos radiación solar, por lo que la temperatura disminuye (Fig.8.1.2; Tab.VIII.1.1a). Con base en las consideraciones mencionadas en la metodología, se sugiere que la homogeneidad de la capa de mezcla va de 20°C a un poco más de 30°C sobre la superficie, por lo que se encontró de acuerdo a los promedios de cada estrato de agua, una primer termoclina estacional a los 20 m de profundidad, que tuvo una diferencia de 2°C con respecto a la superficie y 6°C con respecto a los 50 m de profundidad (Tab.VIII.1.1a).



**Figura.8.1.2.** Perfil de Temperatura durante la campaña Tehuanos II. **a)** Perfil total de 0 – 2,500 m de profundidad. **b)** perfil de 0 - 100 m de profundidad, muestra los intervalos de temperatura en cada una de las capas de la zona eutrófica.

### 8.1.3 Perfil por zona.

El promedio a los 50 m de profundidad del análisis por zona (Tab.VIII.1.2) y del perfil total del GT (Tab.VIII.1.1a), mostraron una diferencia de 1° a 2°C con respecto a los 18°C marcado como temperatura base de la tapa de la termoclina promedio anual del GT .

**Tabla.VIII.1.2.** Valores de temperatura por zona (°C). **a)** Zona Oeste; **b)** Zona Centro, donde se encontró la mínima temperatura superficial; **c)** Zona Este, considerada como el área cálida debido a la máxima temperatura superficial encontrada.

| <b>a) Zona Oeste</b>   |          |           |           |            |                        |                          |              |                         |              |
|------------------------|----------|-----------|-----------|------------|------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| <b>Profundidad (m)</b> | <b>0</b> | <b>20</b> | <b>50</b> | <b>100</b> | <b>&gt;100-500&lt;</b> | <b>&gt;500-1,000&lt;</b> | <b>1,500</b> | <b>&gt;1,500-2,000≤</b> | <b>2,500</b> |
| <b>Máximo</b>          | 27.713   | 26.900    | 21.800    | 18.210     | 13.054                 | 7.313                    | 3.624        | 2.759                   | 1.895        |
| <b>Mínimo</b>          | 22.457   | 19.617    | 15.723    | 13.172     | 11.450                 | 5.788                    | 3.203        | 2.339                   | 1.834        |
| <b>Promedio</b>        | 26.014   | 23.564    | 19.262    | 14.695     | 12.252                 | 6.329                    | 3.315        | 2.549                   | 1.857        |
| <b>b) Zona Centro</b>  |          |           |           |            |                        |                          |              |                         |              |
| <b>Máximo</b>          | 27.855   | 27.150    | 21.928    | 14.694     | 12.639                 | 7.357                    | 3.881        |                         |              |
| <b>Mínimo</b>          | 21.246   | 20.067    | 13.204    | 12.540     | 11.941                 | 5.230                    | 3.132        |                         |              |
| <b>Promedio</b>        | 24.798   | 22.212    | 16.197    | 13.294     | 12.308                 | 5.961                    | 3.236        |                         |              |
| <b>c) Zona Este</b>    |          |           |           |            |                        |                          |              |                         |              |
| <b>Máximo</b>          | 29.120   | 27.780    | 25.940    | 14.383     | 13.610                 | -----                    | 3.294        |                         |              |
| <b>Mínimo</b>          | 22.016   | 20.330    | 14.220    | 13.230     | 8.933                  | -----                    | 3.084        |                         |              |
| <b>Promedio</b>        | 26.970   | 24.194    | 18.195    | 13.620     | 11.668                 | -----                    | 3.20         |                         |              |

La termoclina de acuerdo a los promedios resultantes de cada zona, permitió visualizar en un contexto numérico la ubicación y forma que adoptó después del Tehuano:

- Zona Oeste.- El promedio de 19.26°C a los 50 m de profundidad (Tab.VIII.1.2a), mostró un grado por encima de la temperatura base de la termoclina (18 °C),esto sugiere que durante el evento de viento la termoclina se hundió, e incluso, a los 100 m de profundidad, se encontraron dos temperaturas de 18°C correspondientes a las dos últimas estaciones muestreadas mar adentro del transecto 1, donde una de ellas fue la máxima temperatura del estrato (18.21°C ) (Tab.VIII.1.1a). Temperatura mayor a 18 °C encontrada hasta los 100 m de profundidad, visualiza el entrampamiento de agua cálida por parte de la curvatura del giro anticiclónico.

- **Zona Centro.-** El promedio general de 16.19°C a los 50 m de profundidad (Tab.VIII.1.2b), sugiere que la termoclina por encima de los 18°C subió pero sin llegar a la superficie, ya que no se encontraron temperaturas menores de 20°C a 0 m, indicando que el espesor de la termoclina se ubicó entre los 30 y 40 m de profundidad.
- **Zona Este.-** Es la única que mostró la base de la temperatura de la termoclina general, tuvo un promedio de 18.19°C (Tab.VIII.1.2c), que sugiere que a pesar de la presencia del Tehuano, ésta no difirió en términos cuantitativos de su posición y si lo hizo, no se elevó hacia la superficie.

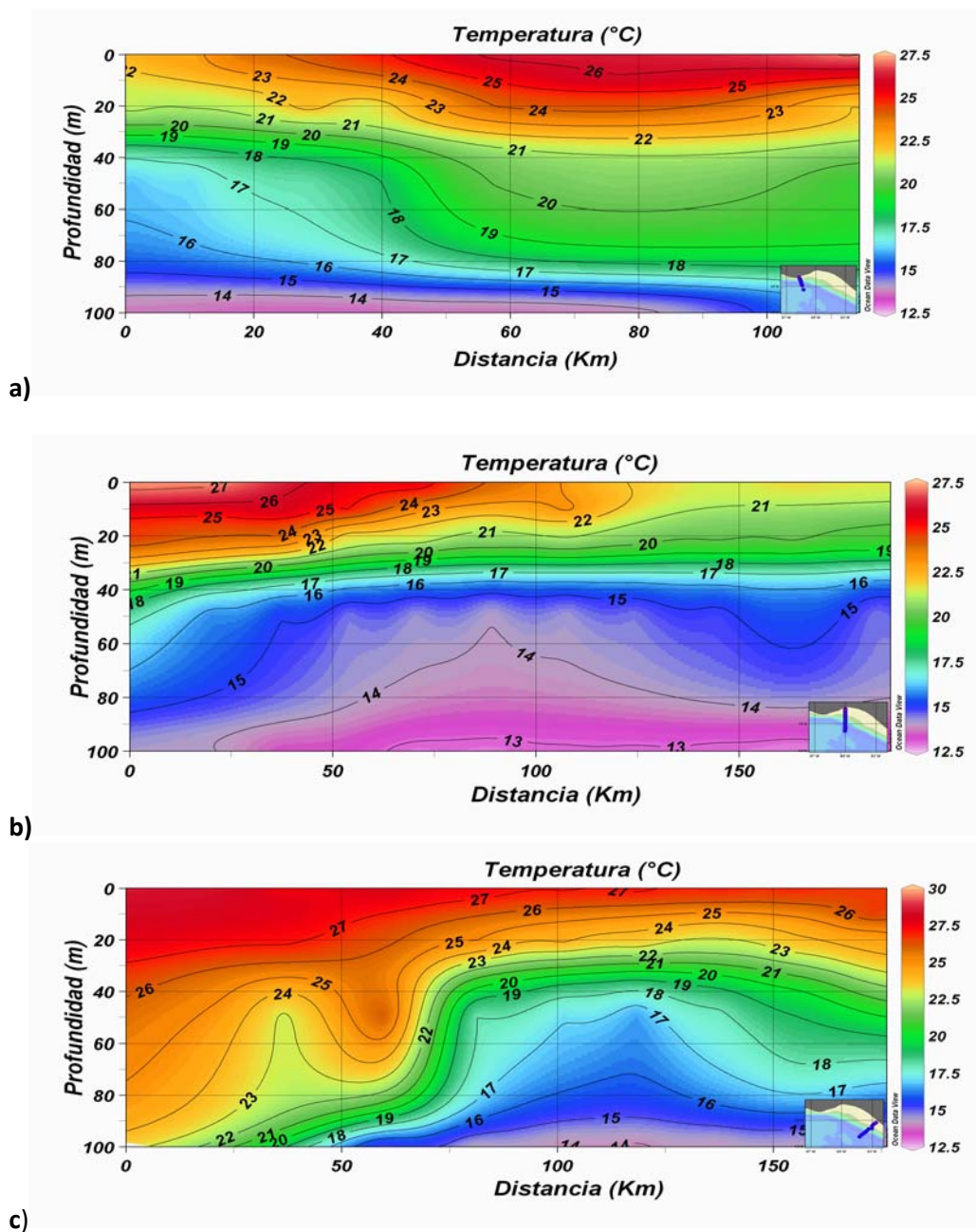
El análisis anterior sobre la distribución de la termoclina, fue de acuerdo a los promedios generales del estrato de agua en los 50 m de profundidad. El perfil hasta los 100 m de profundidad hace evidente los intervalos de distribución de temperatura que acentúan la ubicación de la termoclina con un gradiente pronunciado que contuvo el mayor número de temperaturas de 18°C a los 50 m de profundidad (Fig.8.1.2b).

#### **8.1.4 Perfil por Transecto.**

El análisis en la vertical por transecto que se efectuó por zonas (Oeste, Centro y Este), describen de forma grafica lo analizado por zonas en términos numéricos. El análisis por transecto permitió visualizar y corroborar el perfil que adoptó la termoclina así como su ubicación a lo largo de la columna de agua de 0-100 m de profundidad (Figs.8.1.3)

- **Transecto Oeste.-** Fue el primer transecto que se realizó (16 de Febrero de 1996) y mostró claramente como el desplazamiento de agua fría en dirección Oeste influyó sobre las zonas cercanas a la costa (Fig.8.1.3a). Las isotermas de 18° y 21°C se hicieron más superficiales

con un grosor de 25 a 35 m de profundidad, se extendieron hasta los 40 Km mar adentro donde las isotermas se hundieron y formaron una concavidad de 40 m de espesor. La isoterma de 18°C se hundió hasta los 80 m y la de 21°C a los 40 m. Temperaturas cálidas por encima de 21°C hasta 27.55°C (máximo superficial del transecto) (Tab.VIII.1.3), se registraron fuera de la costa por el giro anticiclónico, ocupando un grosor de 35 m de profundidad. La temperatura mínima registrada por este transecto fue de 1.84°C a los 2,500 m de profundidad y fue la máxima profundidad muestreada en esta zona (Tab.VIII.1.3a).



**Figura.8.1.3.** Perfil de Temperatura por transectos en la campaña Tehuanos II. **a)** Transecto Oeste, correspondiente a la primera sección; **b)** Transecto Centro, principal sección sobre la cual recae el Tehuano; **c)** Transecto Este, fue el último realizado con una sección completa.

**Tabla.VIII.1.3.** Valores de temperaturas por transecto en °C. **a)** de 0 m hasta la profundidad máxima muestreada; **b)** de 0 - 100 m de profundidad.

| <b>Transecto</b>       | <b>Oeste</b>      | <b>Centro</b>     | <b>Este</b>       | <b>Oeste</b>    | <b>Centro</b> | <b>Este</b> |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|---------------|-------------|
| <b>Profundidad (m)</b> | <b>a) 0-2,500</b> | <b>a) 0-1,548</b> | <b>a) 0-1,500</b> | <b>b) 0-100</b> |               |             |
| <b>Máximo</b>          | 27.554            | 27.470            | 29.382            | 27.554          | 27.470        | 29.382      |
| <b>Mínimo</b>          | 1.845             | 3.126             | 3.174             | 13.172          | 12.647        | 13.419      |
| <b>Promedio</b>        | 16.698            | 16.496            | 19.708            | 19.630          | 19.165        | 22.822      |

- **Transecto Centro.-** Es uno de los transectos de la zona centro donde recayó principalmente el Tehuano, la termoclina se mostró mucho más superficial y comprimida sin alguna deformidad significativa en la zona costera, mantuvo un espesor de los 30-40 m de profundidad hasta los 120 Km mar adentro (Fig.8.1.3b). La isoterma de 21°C ascendió hasta los 10 m, por lo que el grosor de la termoclina se encontró limitada de los 10-40 m, hasta el final del transecto (180 Km aproximadamente); esto hace suponer y de acuerdo a la temperatura mínima superficial (Tab.VIII.1.2b), que la isoterma llegó a florecer totalmente hacia la superficie.

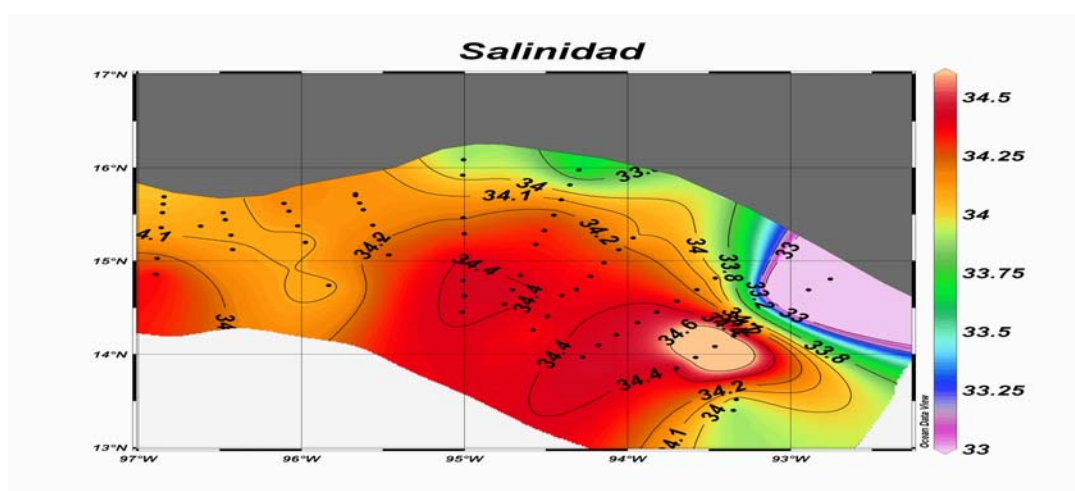
La entrada del agua cálida, proveniente del Este en el Transecto Centro, estuvo limitada en la zona costera del GT, disminuyendo su extensión conforme se alejaba de ella. La máxima temperatura superficial encontrada en la zona costera fue de 27.47°C, con una temperatura mínima a los 100 m (12.65°C) y a los 1,548 m (3.13°C) que fue la máxima profundidad muestreada de la zona Centro (Tab.VIII.1.3a). Los valores muestreados hasta los 100 m fueron los más bajos con respecto a los transectos Este y Oeste (Tab.VIII.1.3b).

- **Transecto Este.-** En este transecto la termoclina contrario a lo sucedido en el transecto Oeste, se hundió en la zona costera (Fig.8.1.3c), por un entrampamiento de agua cálida de 24° a 29.12°C que fue la máxima temperatura superficial detectada durante la campaña (Tabs.VIII.1.1 y Tab.VIII.1.3), por lo que las isothermas de 18° y 21°C estuvieron compactas y ocuparon un espesor de 90 a 100 m de profundidad. A partir de los 60-70 Km de distancia de la costa, las isothermas de 18° y 21°C, tuvieron un grosor de 30 a 45 m de profundidad aproximadamente, hasta los 150 Km de distancia, donde la isoterma de 21°C descendió ligeramente hasta los 40 m y la isoterma de 18°C hasta los 70 m de profundidad, por lo que ahora la termoclina tuvo un grosor de 30 m hasta el final del transecto.

## 8.2 Salinidad

### 8.2.1 Distribución en la Horizontal.

La distribución de salinidad se vio afectada por la presencia del Tehuano, de igual forma que la temperatura, haciendo que su variabilidad fuera en cuestión de días y dentro de la misma área. La salinidad en la superficie se encontró dividida en dos regiones, determinadas por un intervalo de 33.04 a 34.59 con un promedio de 34.121 (Tab.VIII.1.1b). La primera región ubicó los máximos valores por encima de los 34, se encontraron justo por debajo de la acción del Tehuano y siguieron la trayectoria de la franja de agua fría (Suroeste); mientras que la segunda región mostró salinidades de 33 localizadas al Este, principalmente en la zona costera de la cabeza del GT (Figura.8.2.1).

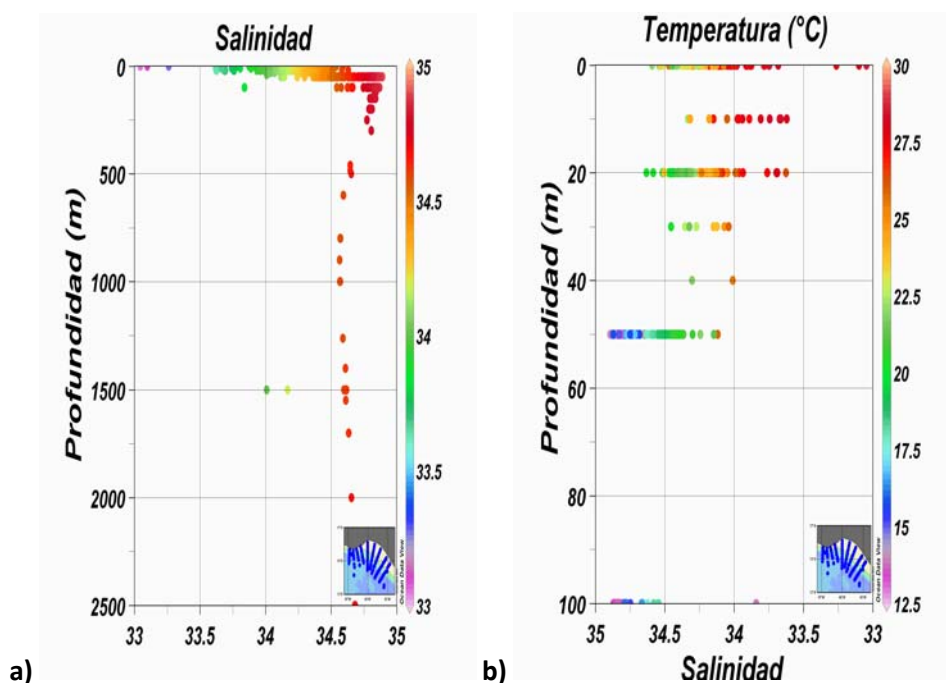


**Figura.8.2.1.** Distribución de la salinidad superficial *in situ*, obtenidas después del Tehuano durante la campaña oceanografía Tehuanos II (16-27 de Febrero de 1996).

### 8.2.1 Perfil ó Distribución Vertical.

La temperatura y la salinidad mostraron la correlación negativa en la distribución típica vertical que existe entre ambas variables; mientras la temperatura mantuvo valores altos en la

superficie y disminuyeron conforme la profundidad, en el caso de la salinidad sucedió lo contrario, con mínimos superficiales y aumenta conforme la profundidad (Figs.8.2.2).



**Figura.8.2.2.** Perfil de Salinidad en la campaña Tehuanos II. **a)** Perfil total de 0-2,500 m de profundidad; **b)** perfil hasta los 100 m, ubica los intervalos de valores para cada estrato de agua muestreado en la zona eutrófica.

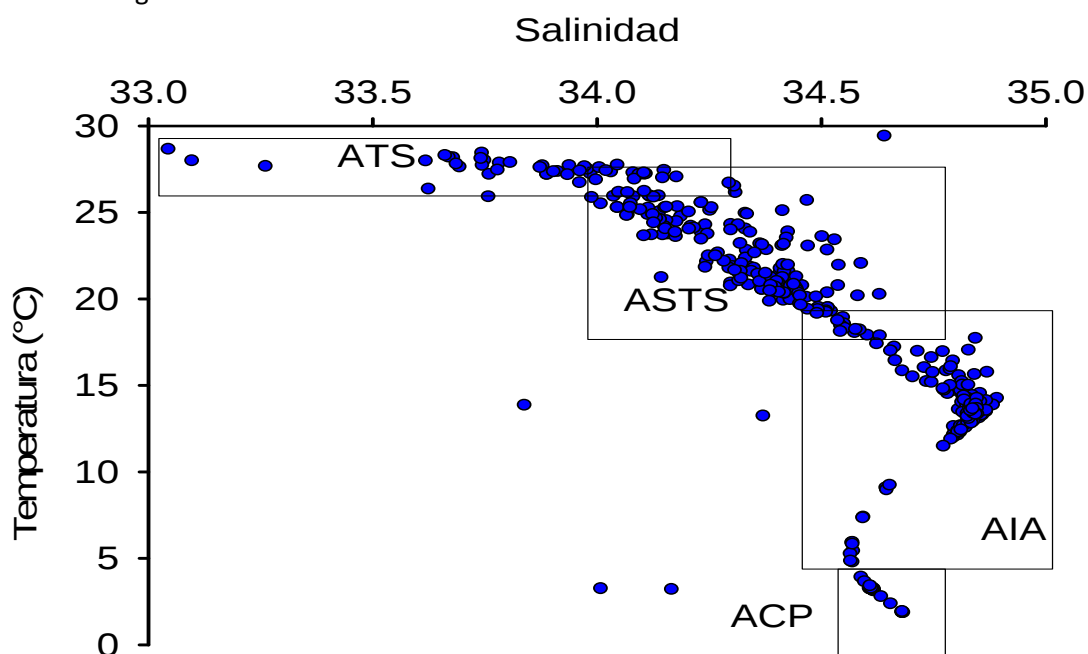
La presencia de los fuertes vientos provocó que la distribución de la salinidad en la vertical cambiara en la zona eutrófica de la columna de agua del GT, ya que salinidades por encima de 34 ascendieron de los 50 m de profundidad hacia la superficie, de acuerdo al mínimo de salinidad hallada por estratos (Tab.VIII.1.1b), su distribución (Fig.8.2.2b) y las características de la masa de agua a esa profundidad (descrito más adelante), para posteriormente disminuir y empezar a tener un aumento a partir de un poco mas de los 100 m de profundidad.

El incremento de salinidad a partir de los 250 m hasta los 1,500 m se observó con una curvatura que indicó el aumento de valores  $>34.5$  y  $<34.7$  propias a la masa de agua presente

en la región, para después ser constantes en sus valores hasta los 2,500 m (Fig.8.2.2a). Una explicación más detallada sobre la masa de agua, a la cual pertenecen estas características, al igual que las profundidades de mezcla, se verá en la siguiente sección. Aquí, nos avocamos principalmente en describir la forma que adopta la salinidad en su distribución vertical.

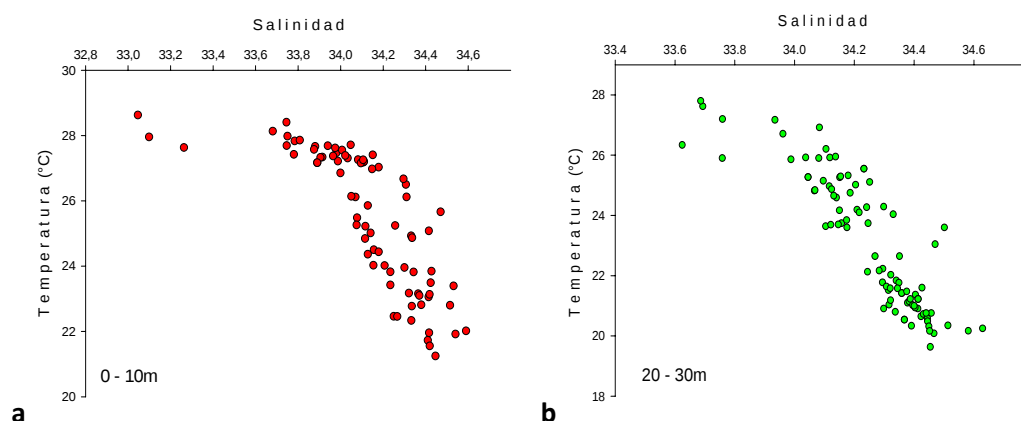
### 8.3 Diagrama Temperatura - Salinidad (T-S)

La distribución de la densidad del agua oceánica que solía presentarse estable, es decir, que las aguas ligeras se localizaban sobre las más pesadas, presentó variaciones de temperatura y salinidad a lo largo de las masas de agua de 0 a 100 m de profundidad, debido a la existencia de fuertes corrientes generadas por el Tehuano. Al hacer el corte del perfil vertical en el GT, se distinguieron las características de cuatro tipos de masas de agua típicas de los océanos, representados por el Agua Tropical Superficial (**ATS**), Agua Subtropical Superficial (**ASTS**), Agua Intermedia del Antártico (**AIA**) y Agua Común del Pacífico (**ACP**) (Fig.8.3.1). El desglose de este diagrama se da a partir de la Fig.8.3.2 a la Fig.8.3.5; donde se observa el intervalo de valores para cada masa de agua, las profundidades en las que llega a estar presente y los estratos de transición en donde se llegan a combinar las características de dos masas de agua.



**Figura.8.3.1.** Diagrama T-S en la campaña Tehuanos II. Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Subtropical Superficial (ASTS), Agua Intermedia del Antártico (AIA), Agua Común del Pacífico (ACP).

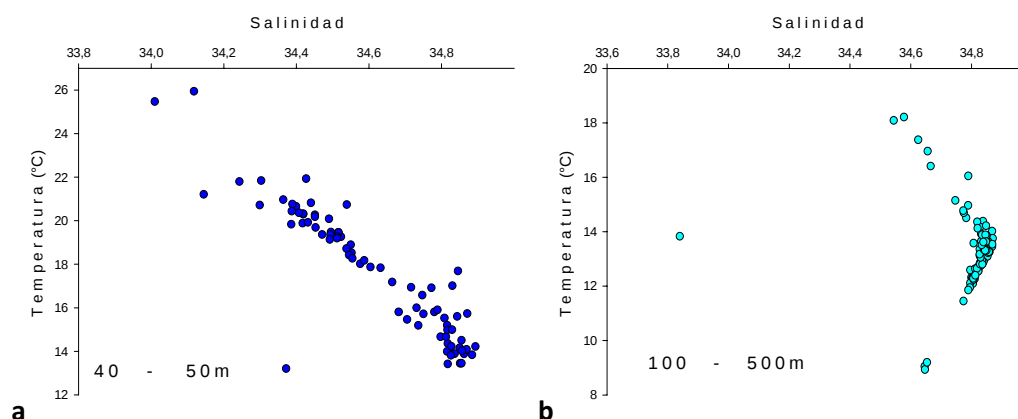
La masa de **agua superficial** representada por el ATS (Fig.8.3.2a), presentó características combinadas de la masa de ASTS, a partir de un estrato de transición entre los 20 y 30 m aproximadamente, de acuerdo a lo mostrado por la Figs.8.3.1 y 8.3.2b y al mínimo de salinidad encontrado en los 20 m (Tab.VIII.1.1b). Las propiedades de esta masa de agua variaron su ubicación dentro del GT; se presentó en la zona Oeste y debajo de la mezcla vertical inducida por el viento con salinidades  $>34$ , asociadas con temperaturas  $>20^{\circ}\text{C}$ , con un promedio superficial de  $25.496^{\circ}\text{C}$  y  $34.121$ . En la zona Este del GT, zona que debido a la relajación del evento permitió la entrada de las aguas cálidas y de baja salinidad con un intervalo de  $33.046$  a  $33.84$ , asociadas a temperaturas de  $25^{\circ}$  a  $29.120^{\circ}\text{C}$  (Fig.8.1.1; Fig.8.2.1; Tab.VIII.1.1).



**Figura.8.3.2.** Diagrama T-S de 0-30 m de profundidad. **a)** Valores de temperatura-salinidad, correspondiente a la masa de Agua Tropical Superficial (ATS), presentó características combinadas con la el ASTS; **b)** estrato de transición de mezcla con la masa de Agua Subsuperficial (ASTS).

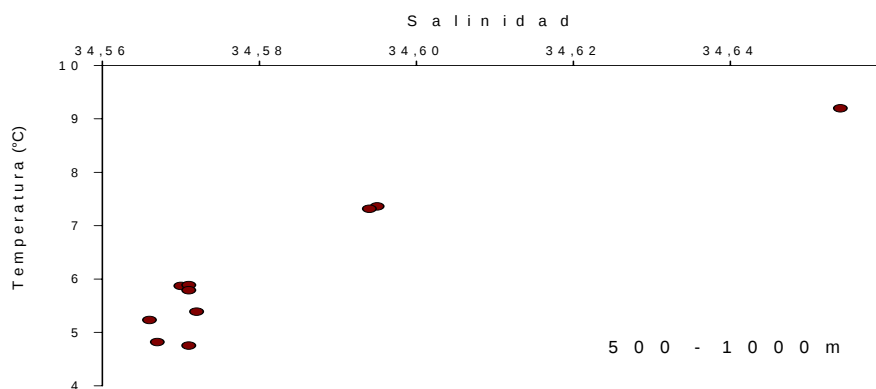
La masa de agua **sub-superficial** o **agua superior** correspondientes a la masa de ASTS, se encontró bien definida en los 50 m de profundidad, con las salinidades máximas de  $34.893$  y mínimos de  $34.010$ , asociados a una temperatura máxima de  $21.928^{\circ}\text{C}$  y un mínimo de

13.204°C (Fig.8.3.1; Fig.8.3.3a; Tab.VIII.1.1), cuyos promedios fueron 15.556°C y 34.711. Abarcó un espesor de 50-100 m de profundidad, lo que indicó que el estrato de transición se localizó a una profundidad mayor a 100 m, pero menor de 500 m, esto ultimo de acuerdo a los valores encontrados en el estrato de 100 m (Tab.VIII.1.1) y a la distribución mostrada en la Fig.8.3.3b, donde se observa el inicio de la presencia de las características combinadas con respecto a la masa de AIA.



**Figura.8.3.3.** Diagrama T-S de 40-500 m de profundidad. **a)** Masa de de Agua Subtropical Superficial (ASTS), se hizo presente en el GT a partir los 50 m de profundidad; **b)** estrato de transición entre la ASTS y AIA se encuentra entre los 100 y 500 m de profundidad.

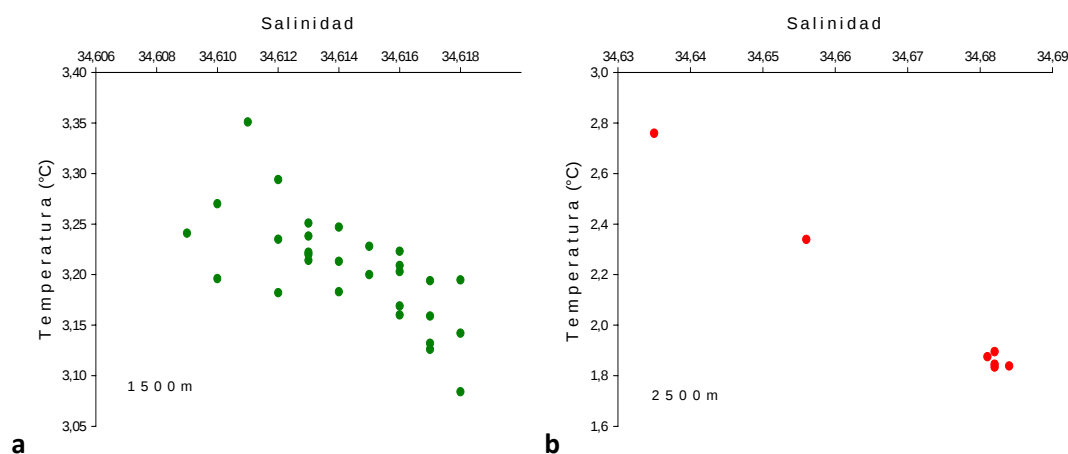
El *agua intermedia* se encuentro a partir de los 500 a 1,500 m de profundidad, representado por la masa de AIA, con salinidades promedio de 34.59 y temperaturas de 5.216°C (Figs.8.3.1 y 8.3.4).



**Figura.8.3.4.** Diagrama T-S de 500 y 1,00 m de profundidad. Masa de Agua Intermedia del Antártico (AIA). de temperatura aproximada a 5°C y salinidad de 34.6.

El *agua profunda*, representada por el ACP, se ubicó entre los 1,500 y 2,500 m.

(máxima profundidad muestreada), con salinidad de 34.62 a 34.64, asociada a una temperatura de 1.83-3.62°C (Figs.8.3.5a y b; Tab.VIII.1.1).



**Figura.8.3.5.** Diagrama T-S de 1,500 y 2,500 m de profundidad. Valores TS de la masa de agua correspondiente al Agua Común del Pacífico (ACP). **a)** Durante Tehuanos II se localizó a partir de los 1,500 m; **b)** hasta los 2,500 m (máxima profundidad muestreada).

## 8.4 Oxígeno Disuelto

### 8.4.1 Distribución Horizontal; análisis de UAO

En Tehuanos II, se distinguieron las tres zonas de concentración de oxígeno en la vertical, definidas por el gradiente de concentración entre las capas o estratos de agua muestreados.

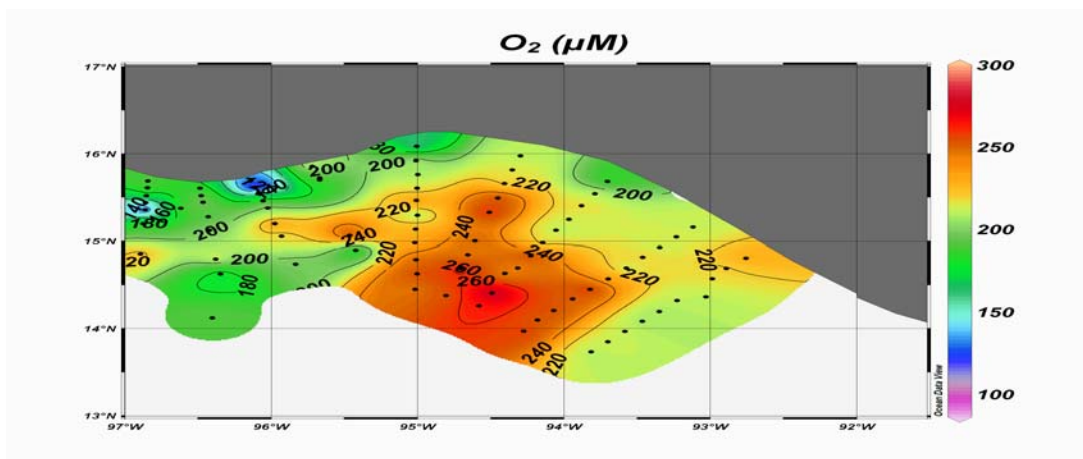
La **zona óxica**; la cual comprendió una capa de agua de mezcla superficial de 0-10 m, con valores máximos de 292.8  $\mu\text{M}$  y mínimos de 86.1  $\mu\text{M}$  con un promedio de 217.1  $\mu\text{M}$  (Tab.VIII.4.1b).

**Tabla.VIII.4.1.** Concentración de  $\text{O}_2$  en Tehuanos II. **a)** En la columna de agua (0 – 2,500 m); **b)** en la capa superficial (0-10 m) y valores de UAO calculados por el Ocean Data View (ODV); la magnitud del valor máximo y su signo indican: (+) mayor consumo de oxígeno y (-) mínimo negativo, corresponde a la máxima producción de oxígeno.

| a) 0-2500m      |                   |                      | b) 0-10m          |                      |                                 |
|-----------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|
| $\text{O}_2$    | ( $\mu\text{M}$ ) | ( $\mu\text{M/kg}$ ) | ( $\mu\text{M}$ ) | ( $\mu\text{M/kg}$ ) | UAO ( $\mu\text{M/kg}$ )<br>ODV |
| <b>Máximo</b>   | 292.8             | 285.7                | 292.8             | 285.7                | 206.7                           |
| <b>Mínimo</b>   | 5.8               | 5.6                  | 86.1              | 84.0                 | -79.3                           |
| <b>Promedio</b> | 114.9             | 112.1                | 217.1             | 211.8                | -3.9                            |

Las concentraciones de oxígeno máximas se ubicaron al Oeste y Este, propias de la circulación y de la fuerte remoción de agua enlazada a un efecto de surgencia. Con respecto al valor de solubilidad del oxígeno disuelto (214  $\mu\text{M}$ , a  $S = 35$ ;  $t = 25^\circ\text{C}$  según Benson y Krause, 1984), se encontró que hubo una sobresaturación de oxígeno hacia el Sur-sureste entre los  $14^\circ\text{N}$  y  $94^\circ\text{W}$  a 175 Km mar adentro con valores  $>220 \mu\text{M}$  (Fig.8.4.1) que fueron las concentraciones más altas medidas en este estudio y que abarcaron en gran parte la franja de agua fría.

La sobresaturación de oxígeno coincidió con el mínimo de temperatura y con la presencia de un parche de marea roja, hallada a esta latitud durante los últimos días de expedición, aportando oxígeno de manera significativa por fotosíntesis.

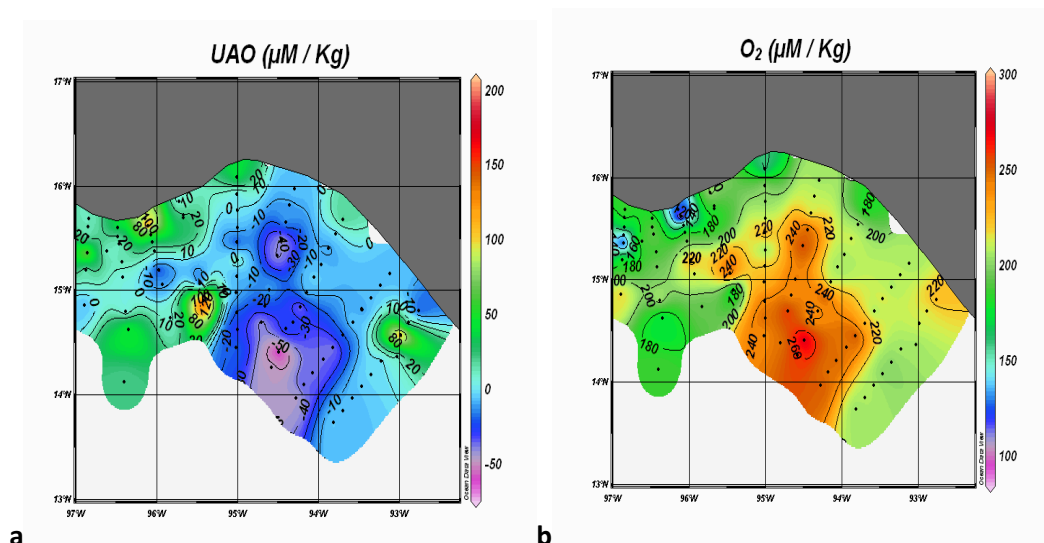


**Figura.8.4.1.** Distribución del oxígeno disuelto superficial *in situ* ( $\mu\text{M}$ ), obtenidas después del Tehuano durante la campaña oceanografía Tehuanos II (16-27 de Febrero de 1996).

La distribución del oxígeno superficial fue respaldada por los resultados obtenidos del análisis de la UAO. Se encontró que las áreas de consumo marcadas por las isopletas de 20  $\mu\text{M/Kg}$  se localizaron principalmente cerca de la costa Oeste, y pequeños parches mar abierto entre los 97° - 96.8°W y 15.5°N que encerraron la máxima concentración de consumo (220  $\mu\text{M/Kg}$ ), y al Este entre los 93°W y 15.5°N aproximadamente (Fig.8.4.2a); concordando con las áreas de menor concentración de oxígeno (Fig.8.4.2b).

La UAO en la superficie, tomando en cuenta el promedio de los datos analizados por el ODV (Tab.VIII.4.1b), resultó con un valor negativo (-3.9  $\mu\text{M/Kg}$ ), esto indica que en proporción, la media se acercó más a una producción que a un uso o consumo de oxígeno. Las isopletas de 0 hasta -50  $\mu\text{M/Kg}$ , que encerraron la máxima concentración de producción (-79.3  $\mu\text{M/Kg}$ ),

abarcó en gran proporción las áreas muestreadas del GT, extendiéndose desde el Centro y Este de la cabeza del GT hacia mar abierto, en aquellas áreas de máxima concentración de oxígeno (Fig.8.4.2a).



**Figura 8.4.2.** Distribución de Uso Aparente de Oxígeno (UAO) y Oxígeno Disuelto en  $\mu\text{M}/\text{Kg}$  en Tehuanos II. **a)** UAO calculado con el con ODV; **b)** oxígeno *in situ*.

#### 8.4.2 Distribución Horizontal; análisis por horario

La UAO también fue analizada para saber el uso o producción de oxígeno durante la madrugada, día, tarde y noche (Tab.VIII.4.2), resultando que:

- Durante la madrugada (00:00-06:00), de un total de 15 estaciones muestreadas ( $N=15$ ), el promedio de producción de  $-27.5 \mu\text{M}/\text{Kg}$  de 9 estaciones ( $n=9$ ) localizadas cinco de ellas mar adentro en la zona Centro donde recayó el Tehuano y se registró la temperatura mínima superficial, dos mar adentro del primer transecto Oeste y dos en la zona costera del Este, sobresalió del promedio de consumo de  $19.4 \mu\text{M}/\text{Kg}$  que se

registraron de  $n=6$ , localizadas dos en las inmediaciones del penúltimo transecto de la zona Este y dos en la parte costera del Oeste, uno a las afueras del primer transecto del Oeste y otro en la zona costera Este. La producción máxima de oxígeno resultante durante este intervalo de horas fue de  $-74.7 \mu\text{M/Kg}$  asociado a un consumo máximo de  $38.9 \mu\text{M/Kg}$  y un mínimo de producción de  $-6.3 \mu\text{M/Kg}$  con un mínimo de consumo de  $11.5 \mu\text{M/Kg}$ .

- Durante el día (06:00-12:00), a pesar de que la relación de muestreo de 26 estaciones resultaron 23 que registraron consumo y 3 de producción; el promedio de producción de  $-41 \mu\text{M/Kg}$  de las estaciones ubicadas dos de ellas en la región Sur de los transectos de la zona Centro, donde recayó uno principalmente dentro del parche fitoplanctónico ubicado al Sureste de la cabeza del Golfo y se encontró la mayor concentración de oxígeno superficial, fue mayor que el promedio de consumo ( $15.8 \mu\text{M/Kg}$ ) de aquellas estaciones localizadas en toda la franja costera Oeste, Centro y Este de la cabeza del Golfo.
- En la tarde (12:00-17:00) de un total de 29 estaciones muestreadas, 19 mostraron un promedio de producción de oxígeno de  $-21.9 \mu\text{M/Kg}$  que fue menor al promedio de consumo  $26.9 \mu\text{M/Kg}$  de 10 estaciones.
- En la noche (17:00-00:00), aunque el número de estaciones muestreadas fue menor a la de las demás horas del día ( $N=12$ ), la producción de  $-34.9 \mu\text{M/Kg}$  que se obtuvieron de 5 estaciones localizadas dentro de los transectos de mayor concentración de oxígeno fue mayor, al promedio de consumo de  $23.4 \mu\text{M/Kg}$  de las 4 estaciones localizadas en las inmediaciones y costa del primer transecto Oeste y 3 estaciones cerca de la costa Este.

**Tabla.VIII.4.2.** Valores superficiales de UAO ( $\mu\text{M/Kg}$ ), divididas por horarios donde: n, es el número de estaciones que dieron un valor positivo (uso o consumo de oxígeno), o negativo (producción de oxígeno) y N es el total de estaciones muestreadas en ese horario.

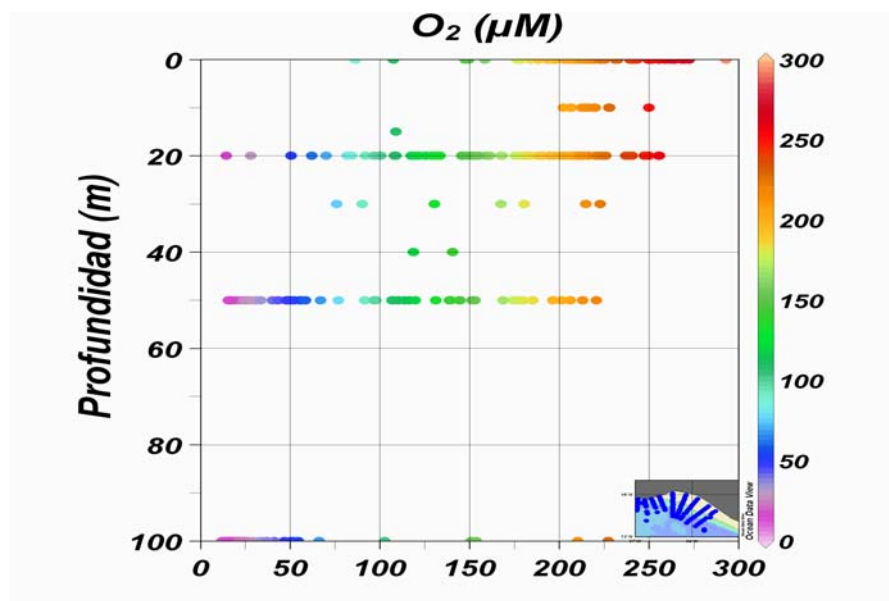
| Horario                               | MADRUGADA<br>(00:00-06:00) | DÍA<br>(06:00-12:00)    | TARDE<br>(12:00-17:00)   | NOCHE<br>(17:00-00:00) |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
|                                       | n(-)=9;n(+)=6;<br>N=15     | n(-)=3;n(+)=23;<br>N=26 | n(-)=19;n(+)=10;<br>N=29 | n(-)=5;n(+)=7;<br>N=12 |
| <b>Máxima Producción</b>              | -74.7                      | -54.6                   | -51.1                    | -52.5                  |
| <b>Mínima Producción</b>              | -6.3                       | -24.6                   | -0.6                     | -5.8                   |
| <b>Promedio de Producción de n(-)</b> | -27.5                      | -41.0                   | -21.9                    | -34.9                  |
| <b>Máximo Consumo</b>                 | 38.9                       | 67.2                    | 126.9                    | 106.0                  |
| <b>Mínimo Consumo</b>                 | 11.5                       | 0.2                     | 1.9                      | 2.3                    |
| <b>Promedio de Consumo n(+)</b>       | 19.4                       | 15.8                    | 26.8                     | 23.4                   |
| <b>Descripción</b>                    | <b>PRODUCCIÓN</b>          | <b>PRODUCCIÓN</b>       | <b>CONSUMO</b>           | <b>PRODUCCIÓN</b>      |

#### 8.4.3 Perfil ó Distribución Vertical.

La segunda zona encontrada en la distribución vertical de oxígeno corresponde a la de **mínimo oxígeno** (Fig.8.4.3), definida por el descenso de concentración de oxígeno  $<100 \mu\text{M}$ , entre los 10 y 50 m de profundidad, dependiendo de la zona (costa ó mar adentro). En los 50 m de profundidad aunque aun se encontraron concentraciones por encima de los  $100 \mu\text{M}$  e incluso con un valor máximo de  $255.8 \mu\text{M}$ , en promedio general la concentración de oxígeno en este estrato fue de  $80.5 \mu\text{M}$ , lo que sugiere que es a partir de los 50 m de profundidad donde la zona de mínimo oxígeno se hizo general para toda la zona muestreada en el GT.

El descenso de oxígeno a los 50 m coincide con la termoclina promedio, por lo que se puede definir como la oxiclina promedio en ausencia de fuertes reactores de viento que cambien su distribución. La oxiclina también fue definida por el cambio de concentración abrupto con respecto a los estratos de agua superior. La diferencia de concentración de

oxígeno en los 20 m de profundidad con respecto al estrato de mezcla superficial fue de 53.2  $\mu\text{M}$ , mientras que en los 50 m hubo una diferencia de 83  $\mu\text{M}$  con respecto a los 20 m de profundidad y 137  $\mu\text{M}$  de oxígeno de diferencia con respecto a la superficie (Tab.VIII.4.3). La zona de mínimo oxígeno comprendió los estratos de agua muestreados de 20 - 500 m de profundidad.



**Figura.8.4.3.** Perfil de oxígeno de 0 – 100 m de profundidad en Tehuanos II. El promedio es de 130.4  $\mu\text{M}$ , dentro de este corte de columna de agua.

El descenso de oxígeno en la vertical, fue también respaldado por los valores de UAO (Tab.VIII.4.4), los cuales mostraron que en el estrato superficial de mezcla existió producción de oxígeno, mientras que a partir de los 20 m se inició el consumo del mismo. Este descenso no implica el inicio de la zona de mínimo oxígeno, ya que aun se encontraron concentraciones promedio  $>100 \mu\text{M}$  de oxígeno, sin embargo indica que a esa profundidad posiblemente fue la correspondiente a la profundidad de compensación general del GT.

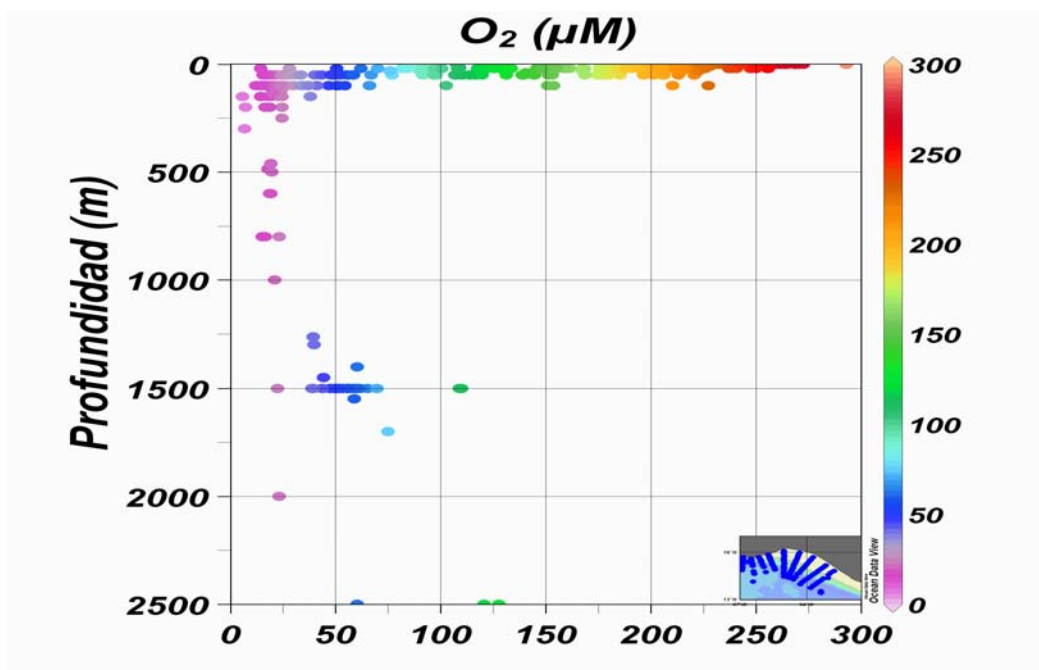
**Tabla.VIII.4.3.** Concentración de O<sub>2</sub>, por estrato de agua dentro de la columna del GT, durante la campaña Tehuanos II.

| Prof. (m)      | 0     |       | 20    |       | 50    |       | 100   |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| O <sub>2</sub> | μM    | μM/kg | μM    | μM/kg | μM    | μM/kg | μM    | μM/kg |
| Max            | 292.8 | 285.7 | 255.8 | 249.5 | 212.9 | 207.7 | 227.2 | 221.6 |
| Min            | 86.1  | 84.0  | 14.2  | 13.9  | 15.6  | 15.2  | 12.0  | 11.7  |
| Prom.          | 217.1 | 211.8 | 163.8 | 159.8 | 80.5  | 78.5  | 34.9  | 34.0  |
| Prof. (m)      | 500   |       | 1500  |       | 2500  |       |       |       |
| O <sub>2</sub> | μM    | μM/kg | μM    | μM/kg | μM    | μM/kg |       |       |
| Max            | 37.9  | 37.0  | 109.8 | 107.1 | 127.6 | 124.5 |       |       |
| Min            | 5.8   | 5.6   | 22.3  | 21.7  | 23.2  | 22.6  |       |       |
| Prom.          | 18.9  | 18.5  | 56.8  | 55.5  | 82.9  | 80.9  |       |       |

**Tabla.VIII.4.4.** Valores de UAO calculado por capa de agua y valores de UAO por ODV. **a).** Capa de agua superficial (0-10m) (t=25°C y S=34); **b).** Capa de agua a 20m de profundidad (t= 24°C y S=34).

| UAO         | (μM)<br>cal.         | ODV<br>(μM/kg) | (μM/kg)<br>cal. | (μM)<br>cal.      | (μM/kg)<br>ODV | (μM/kg)<br>cal. |
|-------------|----------------------|----------------|-----------------|-------------------|----------------|-----------------|
| Máximo      | 124.84               | 206.74         | 126.94          | 201.71            | 206.74         | 202.06          |
| Mínimo      | -81.86               | -79.33         | -74.71          | -39.80            | -24.40         | -33.56          |
| Promedio    | -61.41               | -3.63          | -0.84           | 52.14             | 48.47          | 56.14           |
| Descripción | <b>a) PRODUCCIÓN</b> |                |                 | <b>b) CONSUMO</b> |                |                 |

La extensión de la zona de mínimo oxígeno llegó hasta los 1,250 m de profundidad (Figura.8.4.4), en donde se inició un incremento en la concentración correspondiente a la tercera zona en la distribución vertical de oxígeno; la **zona de advección**, cuyos valores máximos se dieron a los 1,500 m con 109.8 μM y un mínimo de 22.3 μM con una diferencia de 37.9 μM con respecto al estrato superior analizado (500 m).



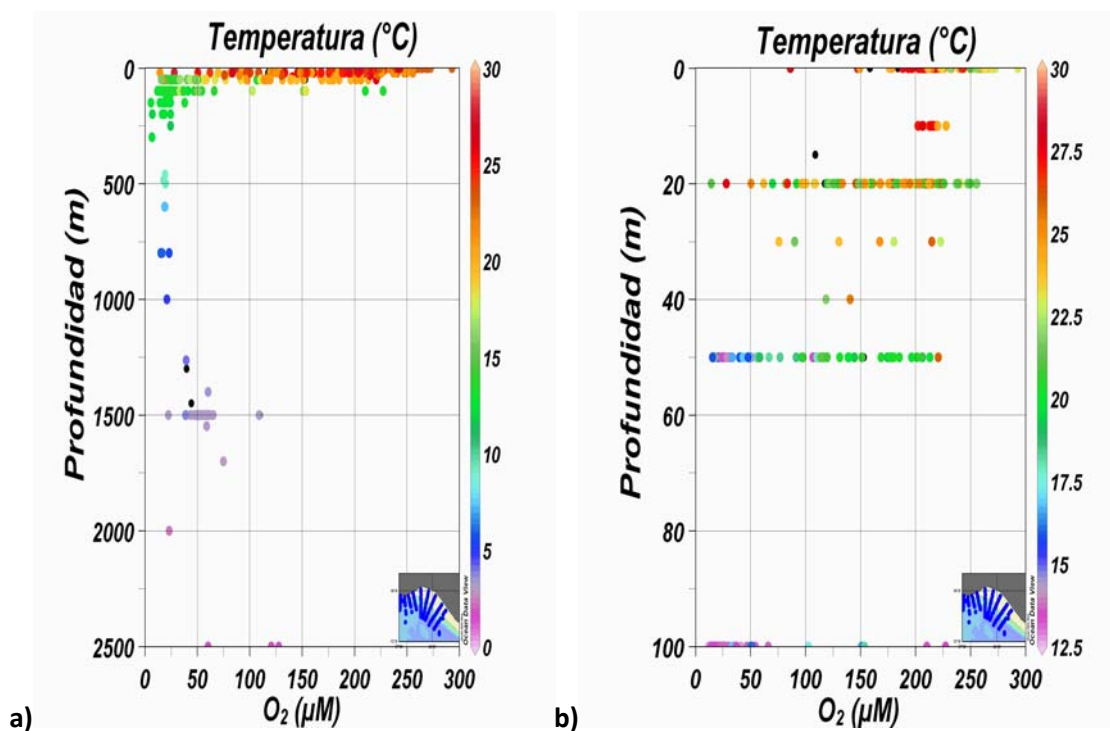
**Figura.8.4.4.** Perfil total de oxígeno disuelto en Tehuanos II, con máximo superficial de 293  $\mu\text{M}$ ; mínimo a los 500 m de 6  $\mu\text{M}$  y promedio de 115  $\mu\text{M}$ .

#### 8.4.4 Perfil; relación Oxígeno-Temperatura.

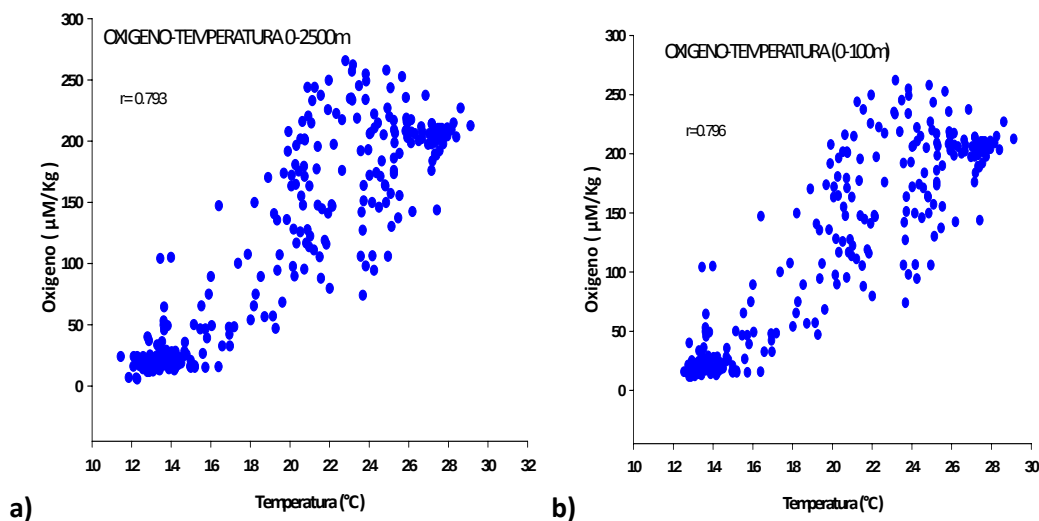
La distribución vertical del oxígeno tuvo una distribución similar al perfil de temperatura, con máximos superficiales decreciendo conforme la profundidad (Figs.8.4.5a y b). Se encontró un **coeficiente de correlación ( $R^2$ )** entre ambas variables de 0.793 (Fig.8.4.6a), esta correlación disminuyó al incrementar los valores de oxígeno a una cierta profundidad, por lo que ya no se siguió la distribución de la temperatura.

La correlación entre el oxígeno y temperatura hasta los 100 m de profundidad ( $R^2=0.796$ ), no mostró alguna diferencia con respecto a la  $R^2$  del perfil total de distribución (Fig.8.4.6b), por lo que se infiere que el estudio se centró en los primeros 100 m. Aun así, la correlación entre ambas variables fue baja porque entre los 20 y 50 m de profundidad todavía

se encontraron concentraciones de oxígeno similares a los de la masa de agua superior ( $>20^{\circ}\text{C}$ ) debidas a la intensa mezcla de agua entre la capa superficial y subsuperficial (Fig.8.4.5b).



**Figura.8.4.5.** Perfil de Oxígeno con respecto a la temperatura en Tehuanos II. Máximo superficial de  $29.12^{\circ}\text{C}$  asociado al máximo de  $292.8 \mu\text{M}$  en oxígeno. **a)** De 0 – 2,500 m de profundidad; el máximo de temperatura a 1,500 m ( $3.624^{\circ}\text{C}$ ), no está relacionado con el máximo de oxígeno ( $109.8 \mu\text{M}$ ); **b)** de 0 – 100 m; el intervalo de  $12.54 - 29.12^{\circ}\text{C}$ , correspondió a un intervalo de  $12 - 293 \mu\text{M}$  de oxígeno.



**Figura.8.4.6.** Correlación Oxígeno–Temperatura. **a)** Distribución de 0-2,500 m de profundidad; **b)** considerado solo el corte vertical de 0–100 m.

#### 8.4.5 Perfil; análisis por zona.

El análisis del oxígeno disuelto en la vertical, mostró que al igual que la temperatura, el GT fue delimitado en tres zonas características por la concentración de oxígeno (Tab.VIII.4.5).

**Tabla.VIII.4.5.** Concentración de  $O_2$  en la vertical y máxima profundidad muestreada por zona, en la campaña Tehuanos II.

| Zona                    | OESTE        |            | CENTRO       |            | ESTE         |            |
|-------------------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| $O_2$                   | $\mu M$      | $\mu M/kg$ | $\mu M$      | $\mu M/kg$ | $\mu M$      | $\mu M/kg$ |
| <b>Máximo</b>           | 243.3        | 237.3      | 292.8        | 285.7      | 268.3        | 261.7      |
| <b>Mínimo</b>           | 14.2         | 13.9       | 5.8          | 5.6        | 13.3         | 13.0       |
| <b>Promedio</b>         | 104.8        | 102.2      | 112.4        | 109.7      | 131.3        | 128.1      |
| <b>Máxima Prof. (m)</b> | <b>2,500</b> |            | <b>1,548</b> |            | <b>1,500</b> |            |

La zona Oeste se caracterizó por tener el promedio de concentración de oxígeno mínimo. El mínimo encontrado en esta zona fue mayor a las demás zonas, lo que muestra

numéricamente que existió una deformación y hundimiento de las isopleas, hicieron que las concentraciones de oxígeno se extendieran mas allá de la zona eutrófica (>100 m), ya que fue la zona de mayor profundidad muestreada.

Zona Centro; los transectos conjuntados en esta zona mostraron el máximo de concentración de oxígeno, con el mínimo que corresponde a los 500 m de profundidad.

Zona Este; zona en la que a pesar de conjuntar el menor número de transectos muestreados, dieron el resultado de la segunda zona de máximas concentraciones de oxígeno y la primera en mayor concentración promedio. La presencia del fitoplancton, la remoción del agua y enriquecimiento por parte de la surgencia, hicieron de esta zona la más rica en concentración de oxígeno.

Los valores de concentración de oxígeno para la columna de agua de la zona eutrófica se muestran en la Tab.VIII.4.6, donde el promedio general de 0-100 m de profundidad fue de 130.4  $\mu\text{M}$ .

**Tabla.VIII.4.6.** Concentración de  $\text{O}_2$  de 0-100 m de profundidad en la campaña Tehuanos II.

| Profundidad (m) | 0-100m        |                  |
|-----------------|---------------|------------------|
| $\text{O}_2$    | $\mu\text{M}$ | $\mu\text{M/kg}$ |
| <b>Máximo</b>   | 292.8         | 285.7            |
| <b>Mínimo</b>   | 12.0          | 11.7             |
| <b>Promedio</b> | 130.4         | 127.2            |

#### 8.4.6 Perfil; análisis por transecto.

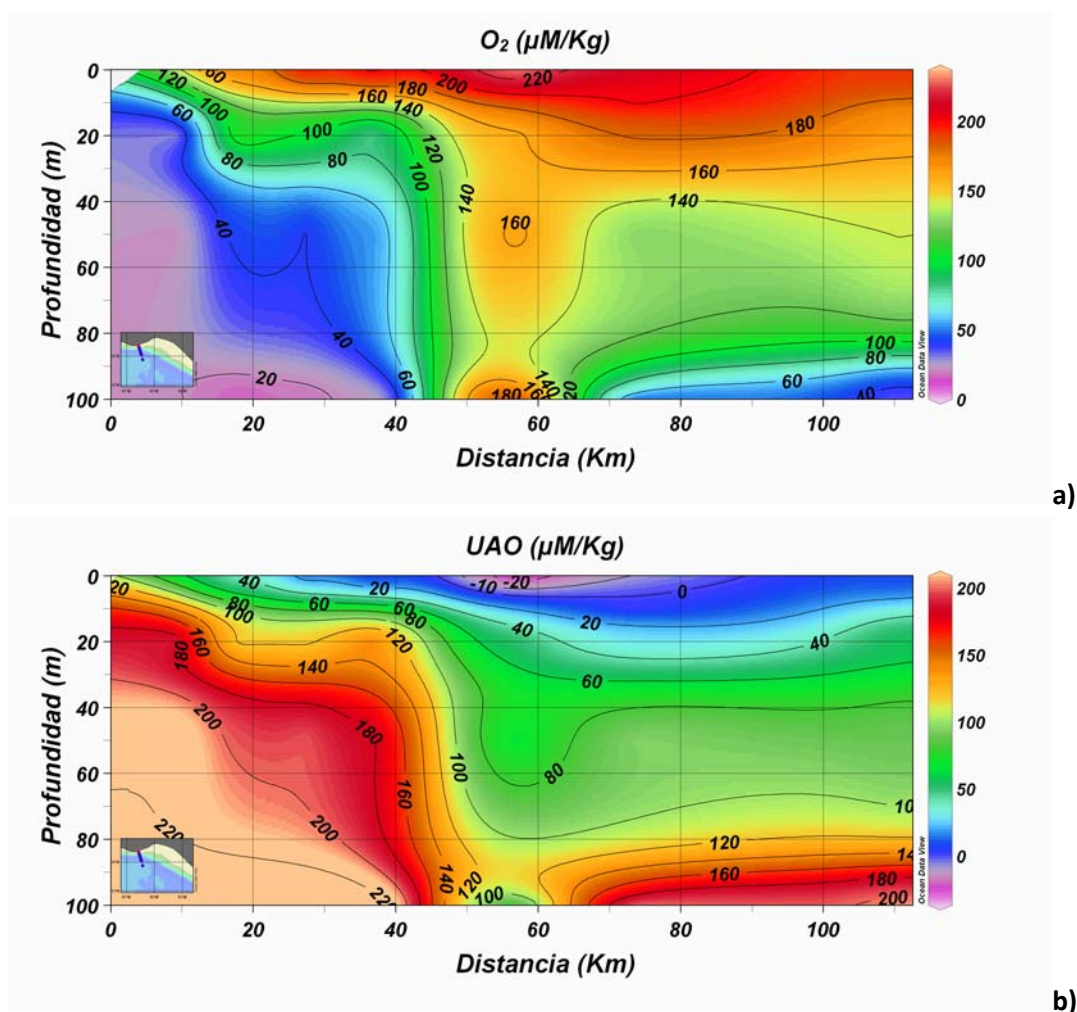
El estrato o capa de agua que describe el inicio de la zona de mínimo oxígeno en la vertical, está marcado por las isopleas de 60  $\mu\text{M/Kg}$  y 80  $\mu\text{M/Kg}$ , la forma que adoptó en la

vertical a lo largo del transecto fue la misma que tomaron los demás estratos de agua por debajo de ella.

- **Transecto Oeste**

El transecto de la zona Oeste, mostró el inicio de la zona de mínimo oxígeno con las isopletras de 60 y 80  $\mu\text{M/Kg}$  presentes desde la superficie a los 10 m de profundidad hasta los 15 Km aproximadamente de la costa (Fig.8.4.7a), donde se hundieron a los 30 y 40 m respectivamente para permanecer hasta los 40 Km de distancia. Por lo que ahora, el estrato que dio la pauta del inicio de la zona de anoxia, tuvo un descenso abrupto y prolongado a partir de los 40 Km de distancia hasta un poco más profundo de la zona eutrífica. Esto indicó que la profundidad de compensación en esta área costera fue muy superficial o no se hizo presente, ya que la Producción Neta Total fue igual a cero, con la igualdad de respiración y producción fotosintética.

La extensión de las isopletras de 60 y 80  $\mu\text{M/Kg}$  en la vertical fue corta, ya que subió a partir los 70 Km hasta los 90 m de profundidad y mantenerse constante hasta el final de transecto. Por lo que ahora, los estratos de agua por encima de la zona de mínimo oxígeno tuvieron un espesor de 0-90 m de profundidad.



**Figura.8.4.7.** Transecto de la zona Oeste en Tehuanos II. **a)** Perfil de  $\text{O}_2$ ; **b)** Perfil de UAO.

Las isopletras de 60 y 80  $\mu\text{M/Kg}$  adquirieron leves ascensos y descensos en la zona costera que formaron concavidades. La concavidad que se formó corresponde al punto de máxima concentración de oxígeno del transecto (237.3  $\mu\text{M/Kg}$ ), con una producción de -36.82  $\mu\text{M/Kg}$  (Tab.VIII.4.7).

**Tabla VIII.4.7.**Concentración de Oxígeno Disuelto y UAO, en la vertical de 0-100 m de profundidad, encontrados por transecto.

|              | OESTE          |        |        | CENTRO         |        |        | Este           |        |        |
|--------------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|
|              | O <sub>2</sub> |        | UAO    | O <sub>2</sub> |        | UAO    | O <sub>2</sub> |        | UAO    |
| Unidad       | μM             | μM/Kg. | μM/Kg. | μM             | μM/Kg. | μM/Kg. | μM             | μM/Kg. | μM/Kg. |
| <b>Max.</b>  | 243.3          | 237.3  | 228.9  | 255.8          | 249.5  | 284.4  | 268.3          | 261.7  | 274.8  |
| <b>Min.</b>  | 14.2           | 13.9   | -36.8  | 13.3           | 13.0   | -31.8  | 18.3           | 17.8   | -44.5  |
| <b>Prom.</b> | 107.7          | 105.1  | 129.3  | 108.7          | 106.0  | 129.1  | 162.9          | 158.9  | 76.3   |

El UAO del transecto Oeste adoptó la forma y siguió el patrón de distribución de máximos y mínimos de concentración de oxígeno (Fig.8.4.7b), por lo que el consumo en la zona de mínimo oxígeno estuvo definido a partir de los 150 μM/Kg.

El UAO mostró un consumo por encima de las isopletras que marcan el inicio de la zona de mínimo oxígeno, a partir de la superficie en la zona costera y a una profundidad promedio de 20 m de profundidad aproximadamente en la zona oceánica del GT, marcado por la isopletra de 20 μM/Kg. La profundidad promedio de inicio de consumo de oxígeno en este transecto, concuerda con el inicio del descenso de oxígeno analizado con el UAO en la capa de agua de 20 m, por lo que se verifica la profundidad promedio de compensación del GT. Así que se puede decir que, los estratos de agua que conformaron la profundidad de compensación tuvieron <100 - 80 μM/Kg de concentración de oxígeno, asociados a un UAO de >0-150 μM/Kg.

- **Transecto Centro**

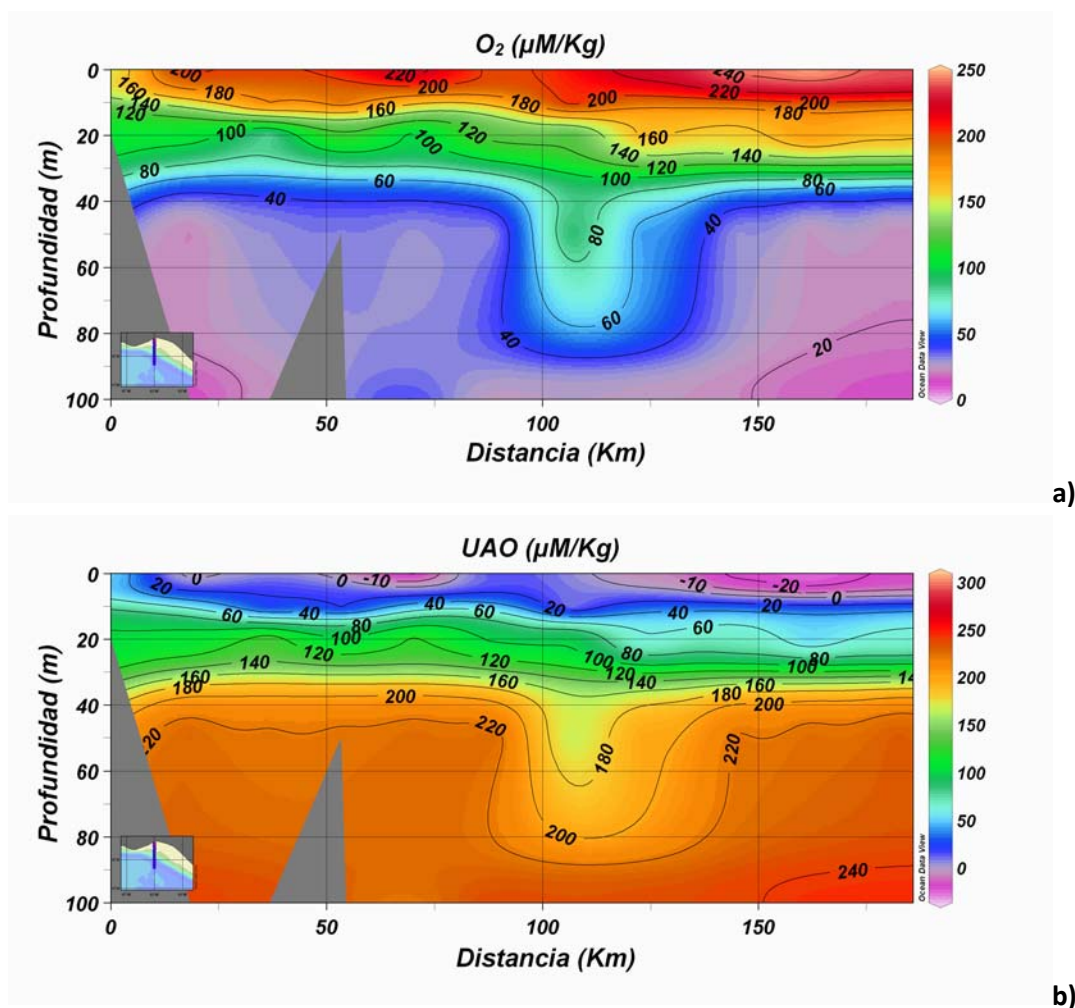
El transecto Centro mostró un inicio de la zona de mínimo oxígeno con un espesor de 30 - 40 m de profundidad que abarcaron las isopletras de 60 y 80 μM/Kg (Fig.8.4.8a). Las

isopletras por encima de ellas tendieron a formar ligeras formas convexas, el primero a los 40 Km de distancia y el segundo a los 75 Km, ambas aún en la zona costera del GT.

Las isopletras de 60 y 80  $\mu\text{M/Kg}$  no mostraron muchas deformaciones a lo largo del transecto, a excepción del descenso que se tuvieron a los 100 Km de distancia de la costa, donde la isopletra de 60  $\mu\text{M/Kg}$  bajo hasta los 80 m y la de 80  $\mu\text{M/Kg}$  hasta los 60 m de profundidad.

El hundimiento de las isopletras que marcaron el inicio de la zona de mínimo oxígeno, formaron una concavidad justo donde se encontraron las temperaturas mínimas superficiales y por lo cual la extensión hacia abajo de la concentración de oxígeno se hizo más evidente. Además es precisamente en este punto donde se muestreó la máxima profundidad de la zona Centro correspondiente a la estación 58 (1,548 m), encerrando la máxima concentración superficial de oxígeno que presentó el transecto en la estación 57 (249.5  $\mu\text{M/Kg}$ ) con mínimos en la costa de 13.0  $\mu\text{M/Kg}$  de oxígeno (Tab.VIII.4.7).

Las isopletras de UAO adquirieron la misma forma de distribución de las isopletras de oxígeno, por lo tanto, el consumo se hizo mucho más superficial y mayor, debido a que el transecto muestreado siguió la trayectoria de la franja de agua fría. Así que ahora las concentraciones de oxígeno estuvieron más plegadas a la superficie y de manera uniforme, con una producción de -31.84  $\mu\text{M/Kg}$  y un consumo en la columna de agua de 284.5  $\mu\text{M/Kg}$ . (Fig.8.4.8b; Tab.VIII.4.7).



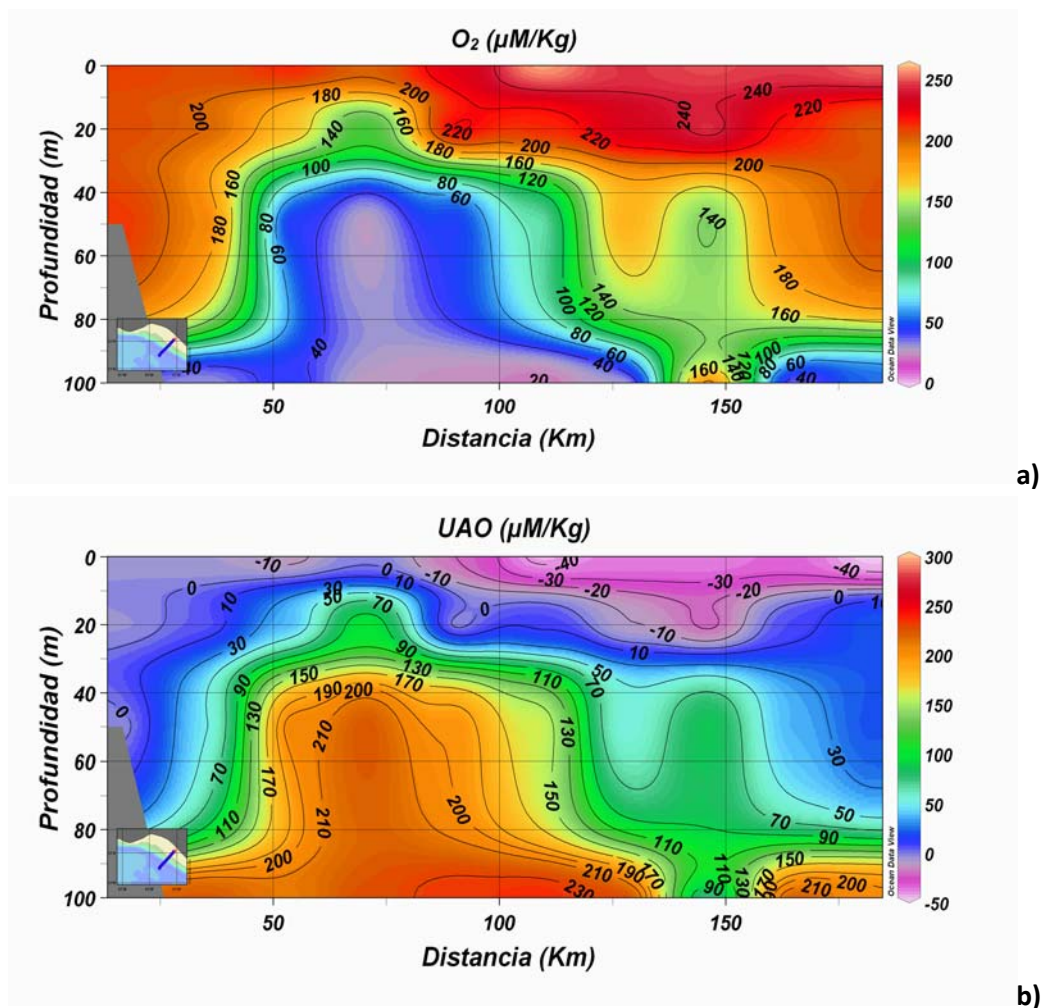
**Figura.8.4.8.** Transecto de la zona Centro en Tehuanos II el cual corresponde dentro de la franja de agua fría ocasionado por el Tehuano. **a)** Perfil de  $O_2$ ; **b)** Perfil de UAO.

- **Transecto Este**

El transecto de la zona Este, presentó el inicio de la zona del mínimo oxígeno, mucho más profunda y las isopletras de 60 y 80  $\mu\text{M/Kg}$  adoptaron formas cóncavas y convexas extensas, un poco más complejas y profundas, a diferencia de los demás transectos (Fig.8.4.9a).

Las isopletras de 60 y 80  $\mu\text{M/Kg}$  se encontraron a los 90 m de profundidad, lo que permitió que el agua por encima de ella adoptara una forma cóncava desde la costa hasta los

50 Km de distancia, donde subieron y adquirieron una forma convexa con un espesor de 35-40 m de profundidad. Este estrato de agua descendió a partir de los 100 Km mar adentro, donde formó la segunda concavidad, la cual fue la más extensa y profunda del transecto. Esta forma cóncava encerró la máxima concentración superficial de oxígeno ( $261.7 \mu\text{M/Kg}$ ) con una producción de  $-44.480 \mu\text{M/Kg}$  (Fig.8.4.9b).



**Figura.8.4.9.** Transecto de la zona Este, donde se halló un parche fitoplanctónico al Sureste de la cabeza del GT. **a)** Perfil de O<sub>2</sub>; **b)** Perfil de UAO.

Las isopletras de 60 y 80  $\mu\text{M/Kg}$  se mantuvieron casi constantes a lo largo del transecto, y a diferencia del estrato superior a ellas, formaron una concavidad más

pronunciada y uniforme, a partir de su ascenso en la costa de los 90 m hasta los 30 - 40 m de profundidad, que se extendió hasta los 100 Km de distancia de la costa, para que la isopleta de 60  $\mu\text{M/Kg}$  tuviera un ligero descenso acorde a la segunda forma cóncava que adoptó el estrato de agua superior al inicio de la zona de mínimo oxígeno

La isopleta de 80  $\mu\text{M/Kg}$  se mantuvo constante a una profundidad de 40 m hasta los 150 Km de distancia, donde junto a la isopleta de 60  $\mu\text{M/Kg}$  se hundieron a una profundidad de 90 m, acorde a la tercera concavidad formada por el estrato de agua superficial.

La mínima concentración de oxígeno de 17.8  $\mu\text{M/Kg}$  corresponde a los 100 m de profundidad, se ubicó por debajo del plegamiento de forma convexa que adquirió el estrato de agua por encima del inicio de mínimo oxígeno, asociado al consumo máximo de 274.87  $\mu\text{M/Kg}$  (Tab.VIII.4.7).

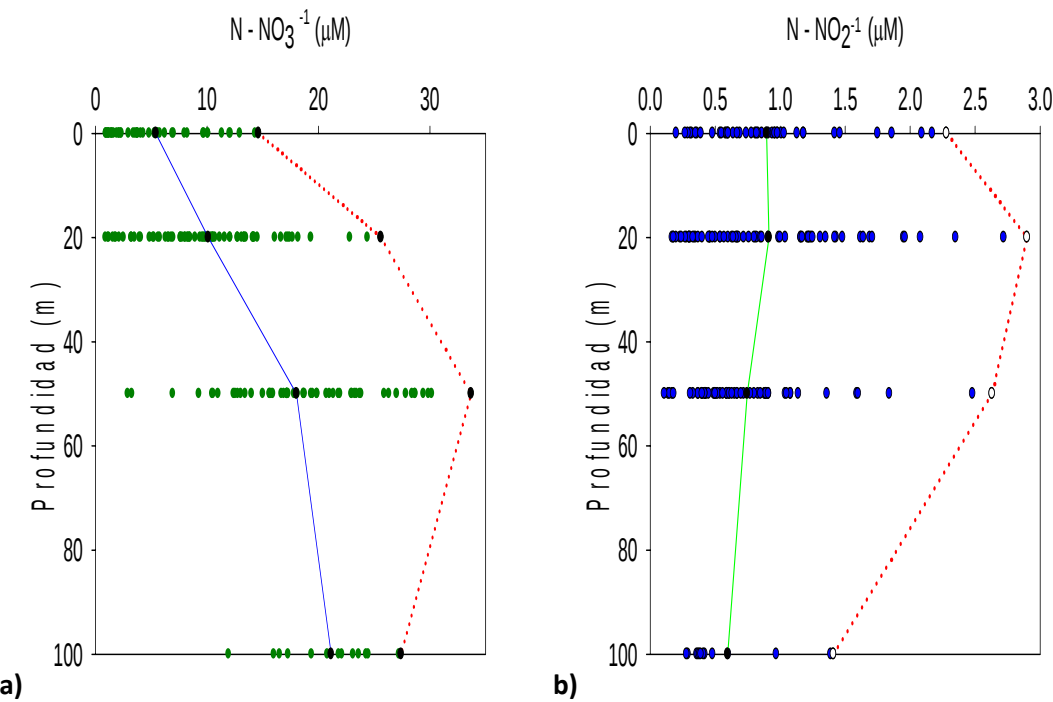
## **8.5 Nutrientes Nitrogenados (NID), Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )**

### **8.5.1 Distribución espacial de $\text{NO}_2^-$ y $\text{NO}_3^-$**

El nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) fue el micronutriente con mayor concentración en aguas oceánicas y el nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) fue inferior ante la presencia del nitrato, que es el ion en la forma reducida del nitrato. Ambos parámetros se hicieron presentes a lo largo de la columna de agua, sin embargo, sus concentraciones máximas tuvieron variaciones espaciales y temporales (Figs.8.5.1a y b).

El  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  presentaron valores mínimos en la superficie e incluso, es en este estrato donde el  $\text{NO}_3^-$  registro la concentración más alta menor a las demás concentraciones máximas registradas en los estratos de 20-100 m de profundidad, a diferencia del  $\text{NO}_2^-$ , el cual la

concentración máxima y menor a los demás estratos se localizo a los 100 m de profundidad (Tab.VIII.5.1).



**Figura.8.5.1.** Perfil de 0-100 m de profundidad de NID en µM. Las líneas de color azul y verde marcan los promedios encontrados para cada estrato, y la línea punteada de color rojo une las concentraciones máximas de cada capa de agua; **a)** NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; **b)** NO<sub>2</sub><sup>-</sup>.

**Tabla.VIII.5.1.** Concentración de los iones NO<sub>3</sub><sup>-1</sup> y NO<sub>2</sub><sup>-1</sup> (µM) por estrato en la campaña Tehuanos II.

|                 | NO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> |      |      |      | NO <sub>2</sub> <sup>-1</sup> |     |     |     |
|-----------------|-------------------------------|------|------|------|-------------------------------|-----|-----|-----|
| Profundidad (m) | 0                             | 20   | 50   | 100  | 0                             | 20  | 50  | 100 |
| Máximo          | 14.6                          | 25.6 | 33.7 | 27.4 | 2.2                           | 2.9 | 2.6 | 1.4 |
| Mínimo          | 0.9                           | 0.9  | 2.9  | 11.9 | 0.2                           | 0.1 | 0.1 | 0.2 |
| Promedio        | 5.4                           | 10.1 | 18.0 | 21.1 | 0.8                           | 0.9 | 0.7 | 0.5 |

La concentración del NO<sub>2</sub><sup>-</sup> tuvo un intervalo de 0.1-2.9 µM dentro de la columna 0 - 100 m de profundidad (Tab.VIII.5.2). La concentración máxima se ubicó a los 20 m de profundidad (Fig.8.5.1b; Tab.VIII.5.1).

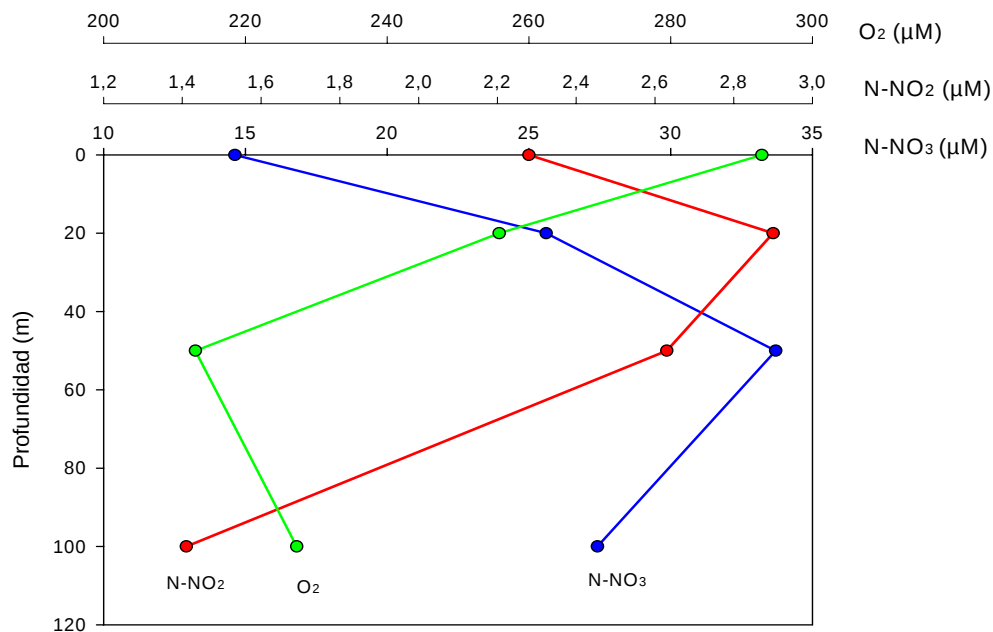
**Tabla.VIII.5.2.** Concentración de los iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  ( $\mu\text{M}$ ) obtenidos en la columna de agua 0 - 100 m de profundidad en la campaña Tehuanos II.

|                        | $\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{M}$ ) | $\text{NO}_2^-$ ( $\mu\text{M}$ ) |
|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Profundidad (m)</b> | <b>0-100 m</b>                    |                                   |
| <b>Máximo</b>          | 33.7                              | 2.9                               |
| <b>Mínimo</b>          | 0.9                               | 0.1                               |
| <b>Promedio</b>        | 12.5                              | 0.8                               |

El  $\text{NO}_3^-$  tuvo un intervalo de concentración de 0.9 - 33.7  $\mu\text{M}$ , a lo largo de 0 - 100 m de profundidad, con la máxima concentración a los 50 m (Tab.VII.5.1), por lo que se ubicó en la zona que fue definida como la termoclina permanente en la capa somera del Golfo (Fig.8.5.1a). El promedio más alto registrado a lo largo de la columna de agua se ubicó a los 100 m de profundidad con 21.1  $\mu\text{M}$  (Tab.VIII.5.1).

### 8.5.2 Relación NID - Oxígeno

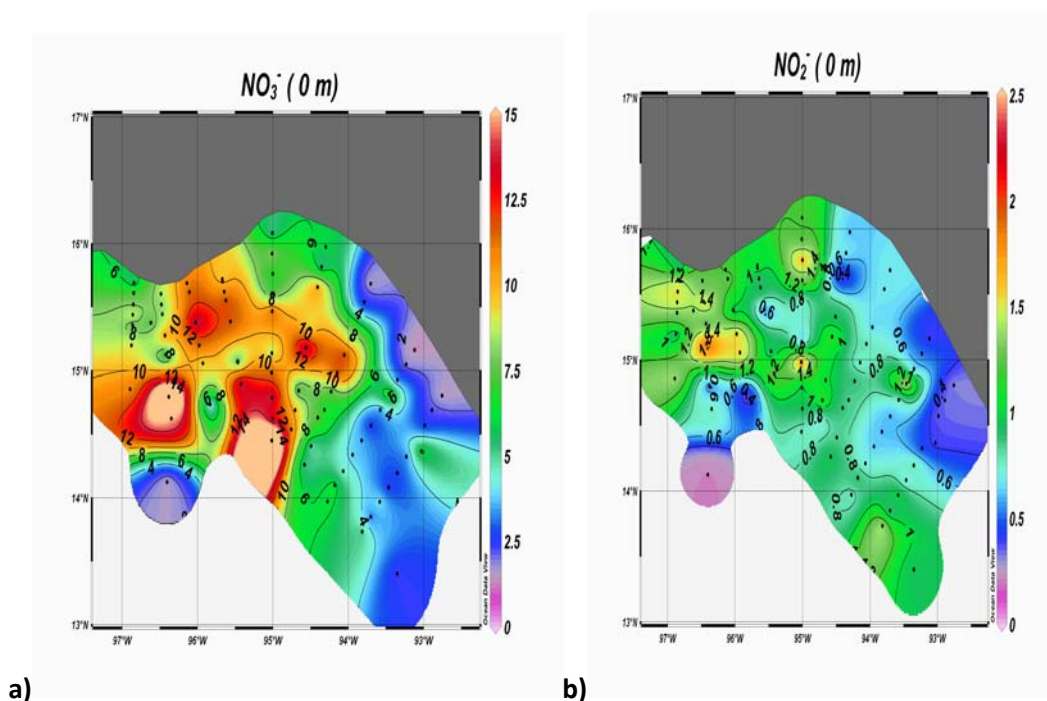
La relación de distribución del  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  con respecto al oxígeno es inversa, ya que bajo condiciones de mínimo oxígeno los iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  presentaron sus concentraciones máximas a los 20 y 50 m de profundidad respectivamente, mientras que en la superficie y a los 100 m de profundidad, donde se mostró un incremento de concentración de oxígeno, los valores de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  fueron bajos (Fig.8.5.2).



**Figura.8.5.2.** Perfil de NID y oxígeno disuelto de 0-100 m de profundidad de acuerdo al promedio de cada estrato de agua.

### 8.5.3 Distribución Horizontal de NID a 0, 20 y 50 m de profundidad.

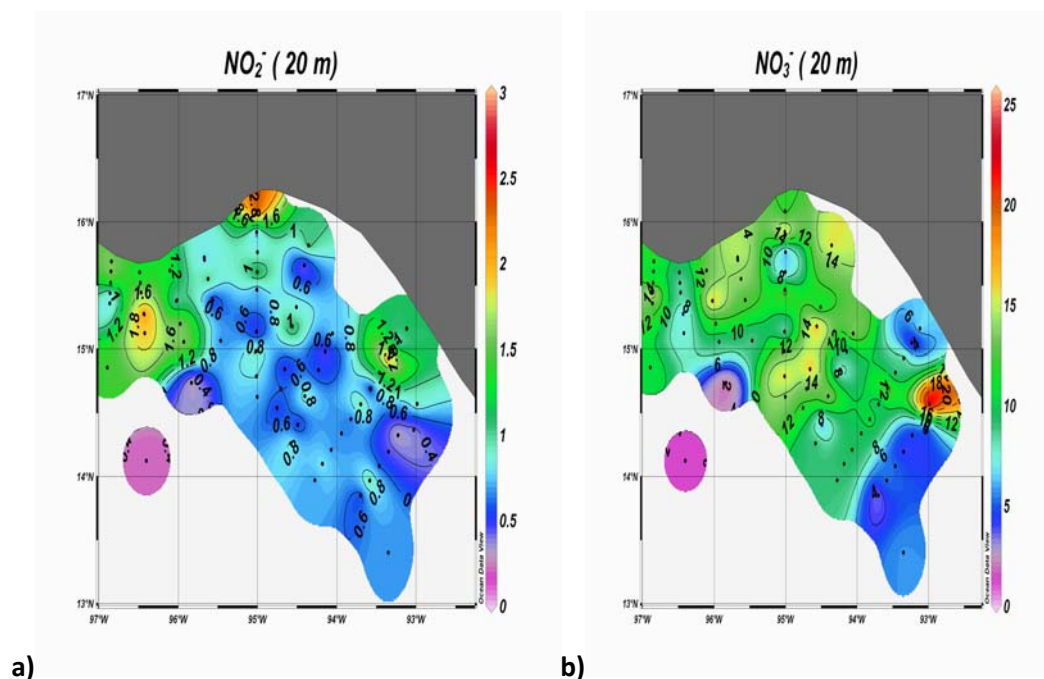
Los  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  mostraron una distribución superficial que siguió el origen y desplazamiento de la franja de agua fría, por lo que las altas concentraciones de ambas variables se vieron orientadas hacia el Oeste, encerradas por las isopletras de  $6 \mu\text{M}$  y  $0.8 \mu\text{M}$  respectivamente, de acuerdo a los promedios resultantes sobre la superficie (Figs.8.5.a y b).



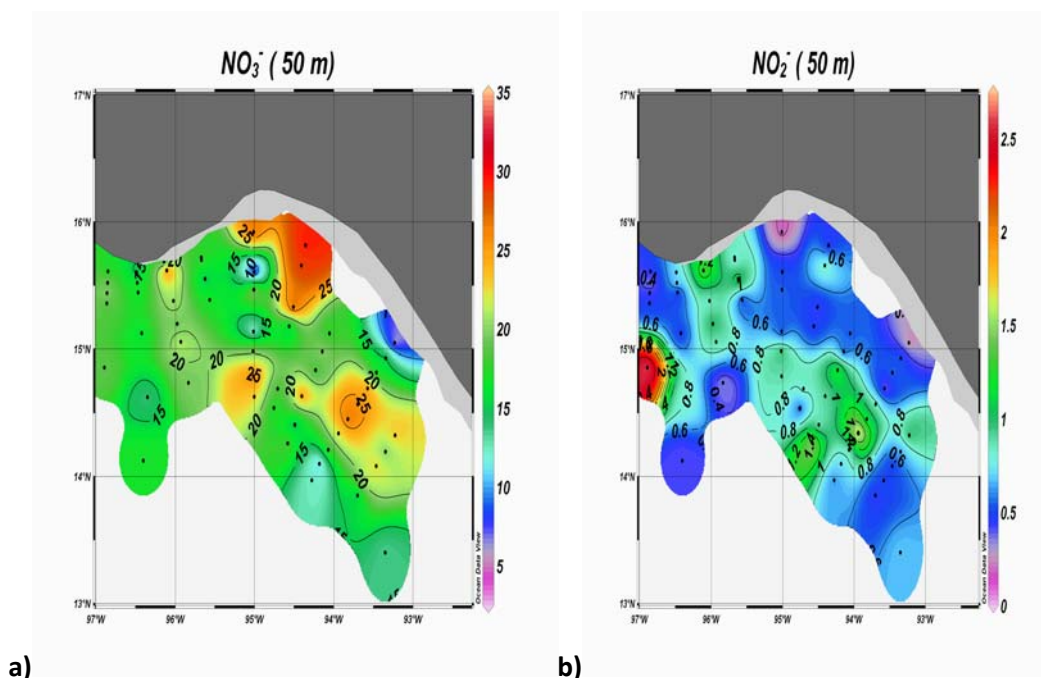
**Figura.8.5.3.** Variación Horizontal de NID ( $\mu\text{M}$ ) en la superficie. **a)**  $\text{NO}_3^-$  con un máximo de 14.6, mínimo de 0.9, y un promedio de 5.4; **b)**  $\text{NO}_2^-$ , con un máximo de 2.2 y mínimo de 0.2, en promedio de 0.8.

Las concentraciones máximas del  $\text{NO}_2^-$  a los 20 m de profundidad, se ubicaron con parches de concentración marcadas por isopletras  $>1 \mu\text{M}$ : al Oeste de la costa extendiéndose hacia mar adentro; en la zona costera del Golfo donde se encontró la máxima concentración ( $2.9 \mu\text{M}$ ) y por ultimo al Este en la zona costera. De esta forma las concentraciones más altas quedaron fuera del área marcada por la franja de agua fría en la superficie y la ascensión más superficial de la termoclina de la zona Centro y por consiguiente fuera de las concentraciones más altas de  $\text{NO}_3^-$  marcada por la isopletras de  $10 \mu\text{M}$  (Figs.8.5.4a y b).

El incremento de los  $\text{NO}_3^-$  a los 50 m de profundidad, se hizo evidente en la costa de la cabeza del Golfo y en la zona oceánica, con parches a lo ancho de concentraciones marcadas por las isopletas  $>20 \mu\text{M}$  (Fig.8.5.5a).



**Figura.8.5.4.** Variación horizontal del NID ( $\mu\text{M}$ ) a 20 m de profundidad que corresponde al primer máximo del  $\text{NO}_2^-$ ; **a)**  $\text{NO}_2^-$ , con un máximo de 2.9, mínimo de 0.1 y un promedio de 0.9; **b)**  $\text{NO}_3^-$  con máximo de 25.6, mínimo de 0.9 y con un promedio de 10.1  $\mu\text{M}$ .



**Figura.8.5.5.** Variación horizontal del NID ( $\mu\text{M}$ ) a 50 m de profundidad que corresponde a la ubicación de la termoclina promedio anual del GT y donde se encontró la máxima concentración de  $\text{NO}_3^-$ . **a)** Nitratos (máxima de 33.7  $\mu\text{M}$  y un mínimo de 2.9  $\mu\text{M}$ , promedio de 18  $\mu\text{M}$ ); **b)** Nitrito (máximo de 2.6  $\mu\text{M}$ , mínimo de 0.1  $\mu\text{M}$  y promedio de 0.7  $\mu\text{M}$ ).

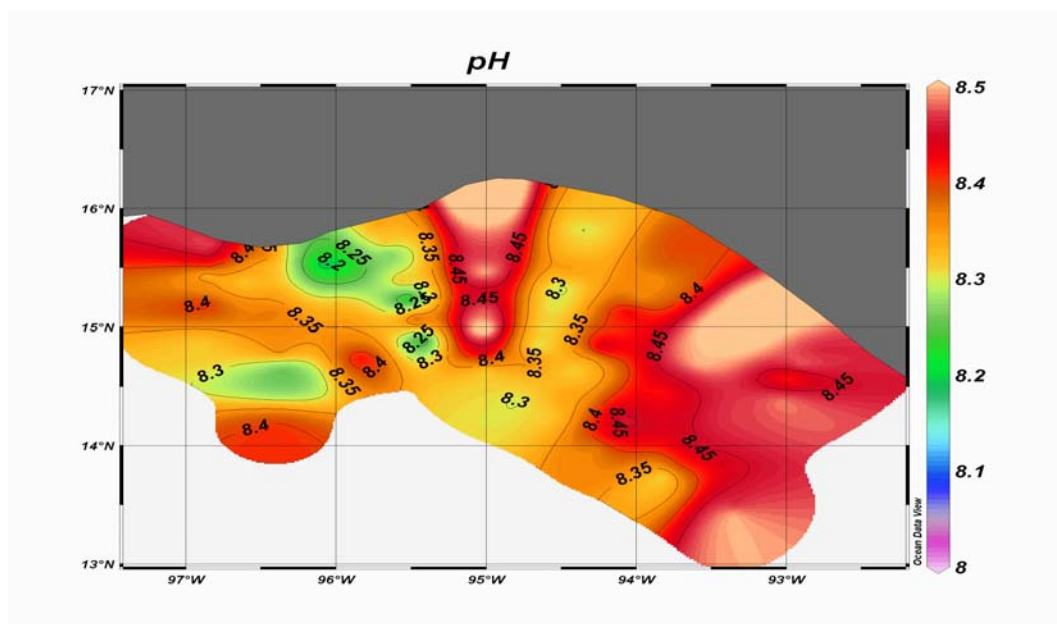
El  $\text{NO}_2^-$  a los 50 m de profundidad, alcanzó su segunda concentración más alta (2.6  $\mu\text{M}$ ), sin embargo el promedio de la concentración medidas indicaron una tendencia hacia los 0.7  $\mu\text{M}$  con un mínimo de 0.1  $\mu\text{M}$ . La máxima concentración del nitrito se encontró en la costa y mar adentro de la zona Oeste y pequeños parches mar adentro en la zona Centro y Este, marcadas por las isopletras  $>0.8 \mu\text{M}$  (Fig.8.5.5b).

## 8.6 pH y AT

### 8.6.1. Distribución Horizontal de pH y AT.

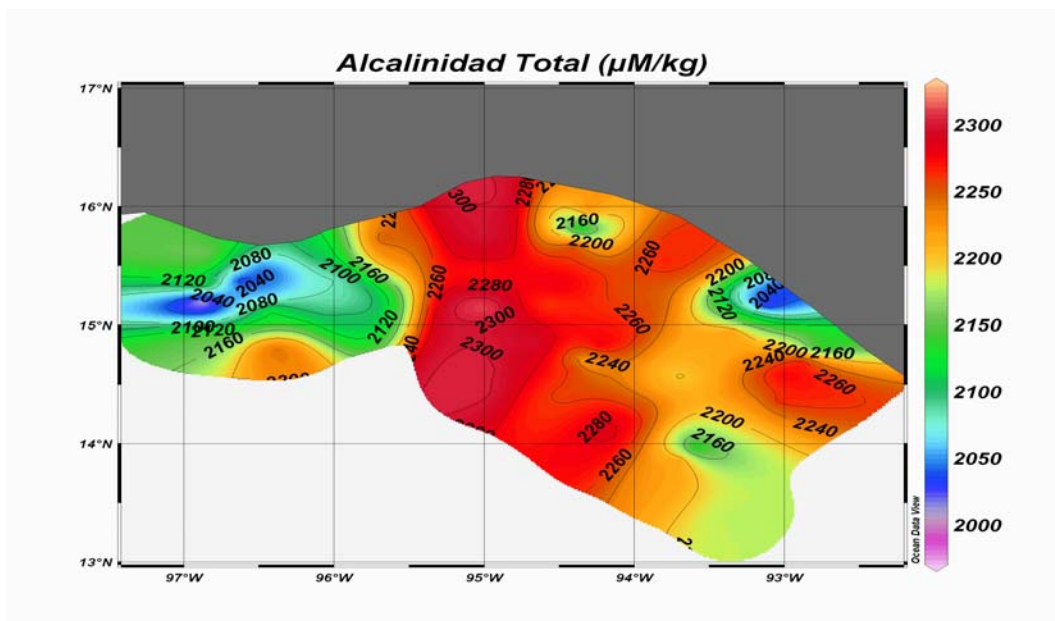
Los valores máximos de pH sobre la superficie se localizaron por la isopleta de 8.4 al Oeste con parches en la costa y mar adentro del Golfo, al Centro entre los 95°W y 16°N donde

se desplegaron valores  $>8.4$  desde la costa hacia un poco más allá de los  $15^{\circ}\text{N}$  y por ultimo en la zona Este que fue donde se abarcó una mayor área de valores  $>8.3$  del promedio en la superficie que encerraron el máximo valor encontrado de 8.49 (Figs.8.6.1).



**Figura.8.6.1.** Distribución superficial de pH en el GT durante la campaña Tehuanos II, con un mínimo de 8.04, máximo de 8.49 y promedio 8.36.

Las concentraciones altas de AT se encontraron más hacia el Este donde se ubicó el parche fitoplanctónico ligeramente hacia el Centro, justo por debajo del jet de viento abarcando el origen de la franja de agua fría, con pequeños parches en la costa y mar adentro en el Oeste. Las isopletas de  $2,160 \mu\text{M/Kg}$  de AT, encerraron las mínimas concentraciones de AT al Oeste y Este, donde se ubicó el hundimiento de las termoclinas, asociados al entrampamiento de agua cálida de un remolino anticiclónico (Fig.8.6.2).



**Figura.8.6.2.** Distribución superficial de AT en el GT durante la campaña Tehuanos II, con un máximo de 2,322  $\mu\text{M/Kg}$ , mínimo de 1976  $\mu\text{M/Kg}$ , y promedio 2,228  $\mu\text{M/Kg}$ .

### 8.6.2 Perfil de pH y AT.

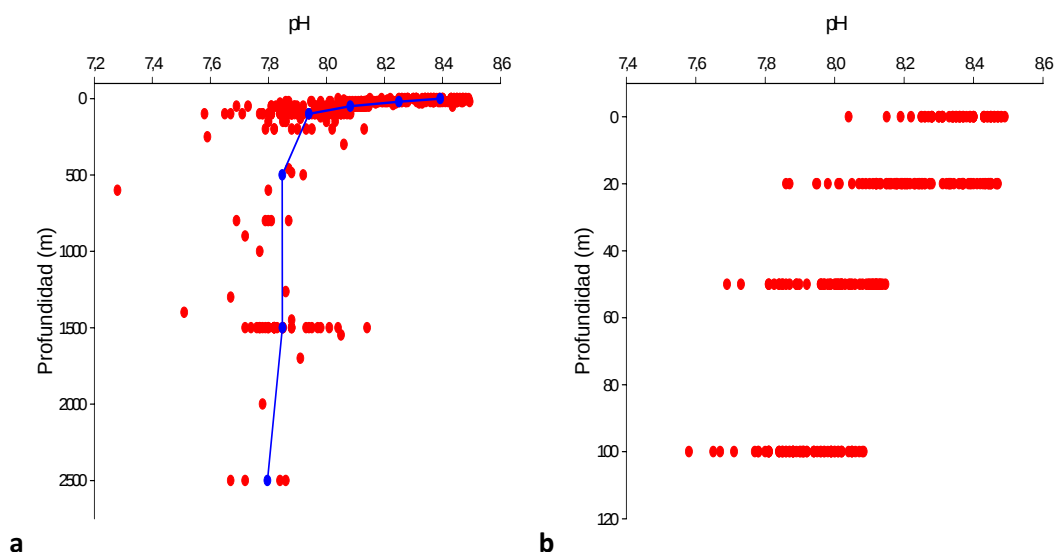
El pH mostró valores de 7.280 - 8.493 en toda la columna de agua (0 - 2,500 m), con promedio de 8.09 (Tab.VIII.6.1).

La AT mostró un intervalo de concentración de 1,946 -2,324  $\mu\text{M/Kg}$ , con un promedio de 2,205  $\mu\text{M/Kg}$  a lo largo de la columna de agua de 0 - 100 m de profundidad (Tab.VIII.6.1).

**Tabla.VIII.6.1.** Valores de pH y AT ( $\mu\text{M/Kg}$ ), obtenidos en la columna de agua 0 - 100 m de profundidad, en la campaña Tehuanos II.

|    | Máximo  | Mínimo  | Promedio |
|----|---------|---------|----------|
| pH | 8.49    | 7.28    | 8.09     |
| AT | 2,324.2 | 1,946.0 | 2,205.7  |

El pH mostró una distribución típica en la vertical, con máximos en las capas de agua superficiales y decreciendo conforme la profundidad (Fig.8.6.3a).



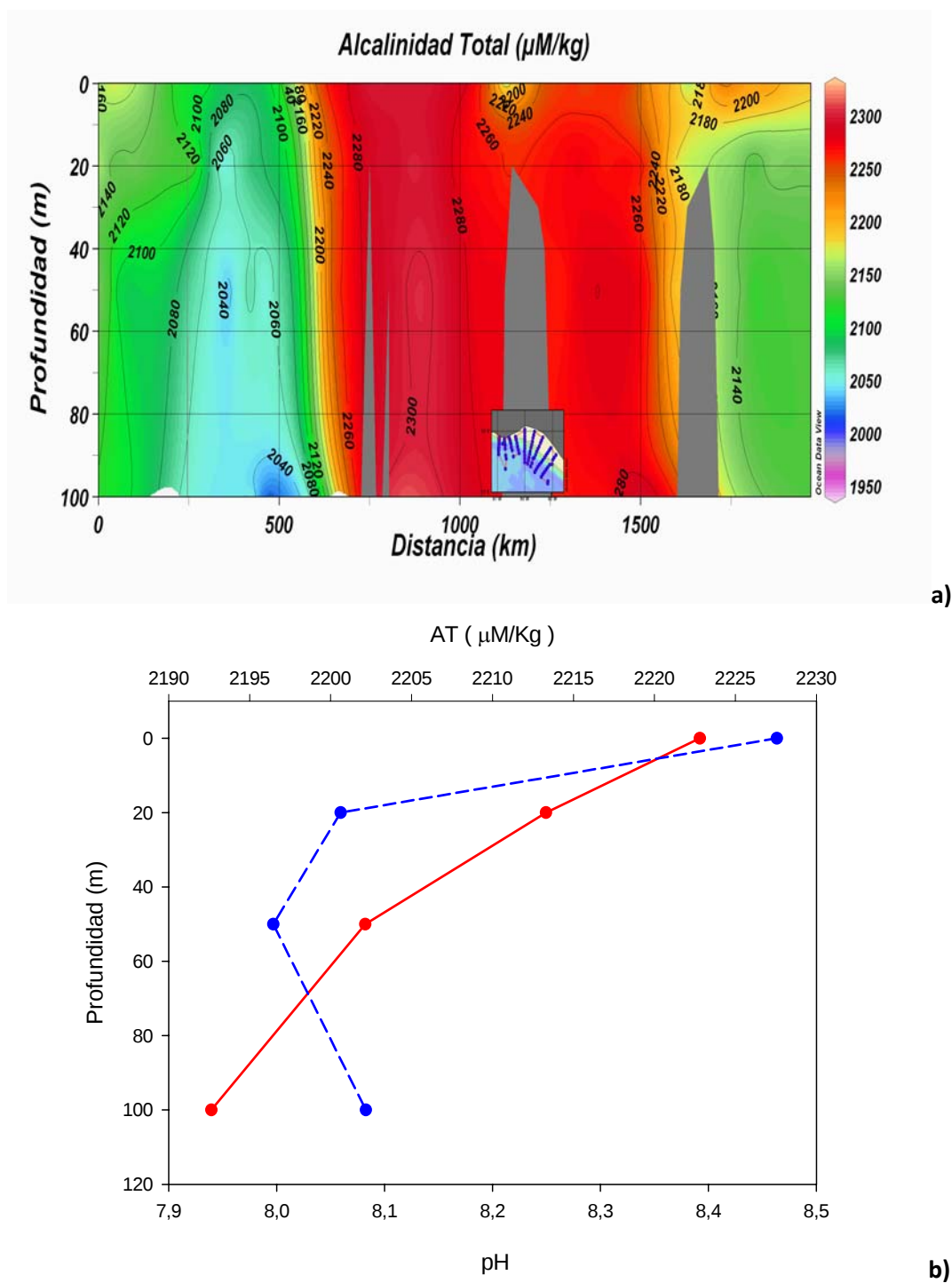
**Figura.8.6.3.** Perfil de pH. **a)** De 0 – 2,500 m de profundidad, la línea sólida es el promedio de los valores para cada estrato de agua; **b)** hasta 100 m de profundidad.

La zona eutrófica que conforman de los 0 - 100 m de profundidad, los niveles de pH no difirió con respecto a los valores de toda la columna de agua muestreada (0 - 2,500 m), al tener un intervalo de 7.5 - 8.4 con un promedio de 8.1 (Tab.VIII.6.2). Sin embargo, es a partir de los 50 m de profundidad en donde se empezó a notar un ligero descenso de pH con valores de 7.6 - 8.1. El pH más bajo que se registró fue en el estrato de agua de 500 m de profundidad con un intervalo de 7.2 - 8.0 y un promedio de 7.7. A partir de los 1,500 m de profundidad se registró un aumento de pH con un intervalo de 7.5 - 8.1 y un promedio de 7.8 (Fig.8.6.3a; Tab.VIII.6.2).

**Tabla.VIII.6.2.** Valores de pH y AT ( $\mu\text{M/Kg}$ ) por estrato de agua en la campaña Tehuanos II.

| Profundidad<br>(m) | pH    |       |       | AT      |         |         |
|--------------------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
|                    | Máy.  | Mín.  | Prom. | Máy.    | Mín.    | Prom.   |
| <b>0</b>           | 8.490 | 8.040 | 8.356 | 2,322.4 | 1,976.3 | 2,227.5 |
| <b>20</b>          | 8.469 | 7.860 | 8.243 | 2,324.2 | 1,956.4 | 2,200.6 |
| <b>50</b>          | 8.146 | 7.690 | 7.992 | 2,320.6 | 1,946.0 | 2,196.4 |
| <b>100</b>         | 8.083 | 7.580 | 7.908 | 2,316.9 | 1,966.5 | 2,202.1 |
| <b>500</b>         | 8.000 | 7.280 | 7.799 |         |         |         |
| <b>1500</b>        | 8.140 | 7.510 | 7.848 |         |         |         |
| <b>2500</b>        | 7.910 | 7.670 | 7.796 |         |         |         |

La distribución de la AT fue uniforme en la vertical, con las isopletras de la superficie que se extendieron de manera casi constante, variando solo en su posición en la horizontal (Fig.8.6.4a). Las isopletras que marcan las concentraciones menores al promedio redondeado de 2,206  $\mu\text{M/Kg}$  para la capa de agua de 0 - 100 m de profundidad (Tab.VIII.6.1), se localizaron con mayor abundancia en la zona Oeste y ligeramente al Este del Golfo. Las concentraciones >2,206  $\mu\text{M/Kg}$  se ubicaron en las estaciones de la zona Centro, concordando con la imagen superficial (Fig.8.6.2; Fig.8.6.4a).



**Figura.8.6.4.** Perfil de AT ( $\mu\text{M/Kg}$ ) de 0 – 100 m de profundidad. **a)** Se observa la separación de concentración por zonas dentro del GT; **b)** Relación de distribución de pH -AT, de acuerdo a los promedios de cada estrato de agua muestreada. La línea sólida corresponde al perfil de pH y la punteada es de AT.

La concentración máxima de AT, se encontró a los 20 m de profundidad con 2,324  $\mu\text{M/Kg}$  y la mínima se ubicó a los 50 m de profundidad con 1,946  $\mu\text{M/Kg}$  (Tab.VIII.6.2).

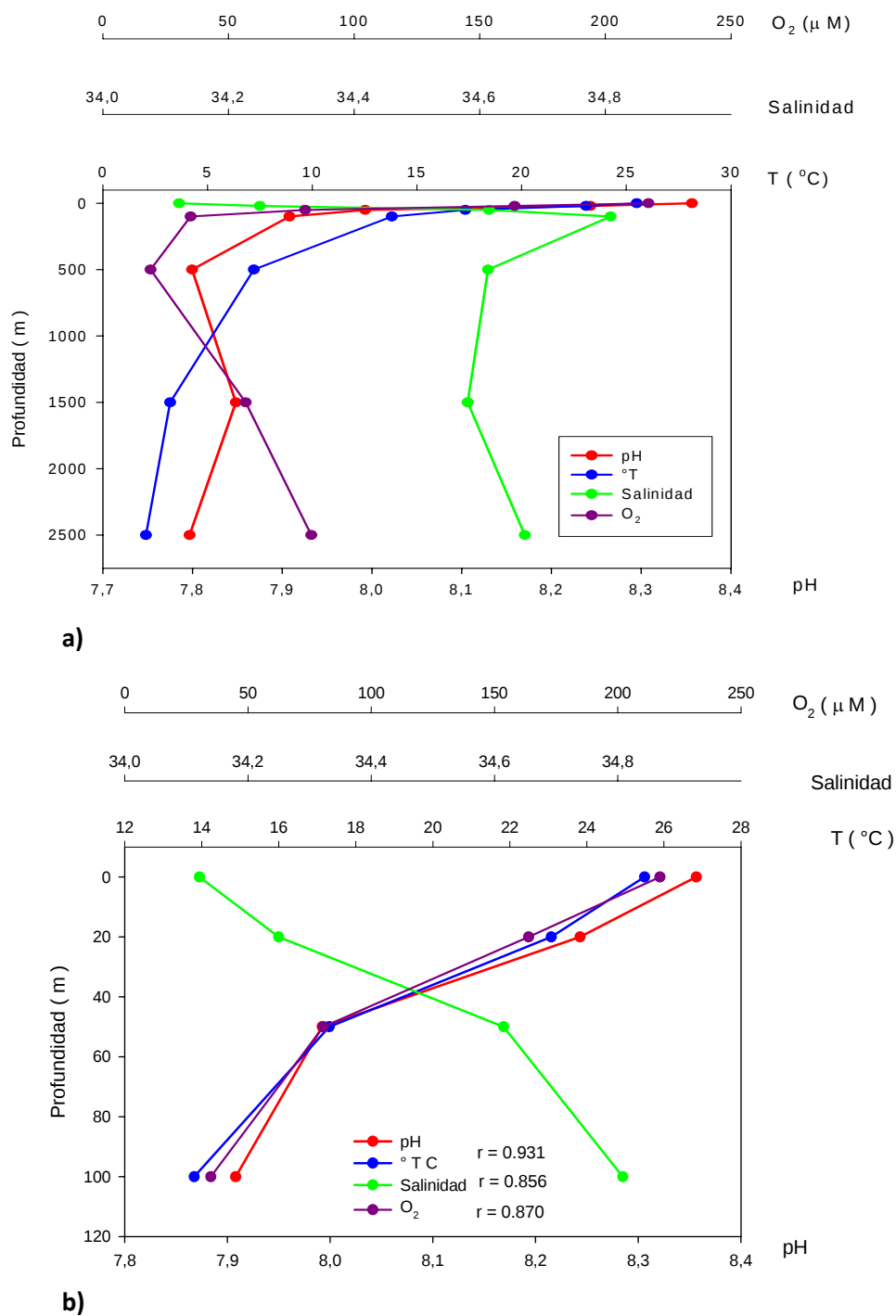
La distribución vertical de pH y AT, de acuerdo a los promedios para cada estrato de agua muestreada de 0 - 100 m de profundidad, mostró la relación directa entre ambas variables, con máximos valores en la superficie y decrecen conforme la profundidad aumenta, a excepción de los 100 m donde se registró un leve aumento en la AT (Fig.8.6.4b).

### **8.6.3 Relación del pH con temperatura, salinidad y oxígeno.**

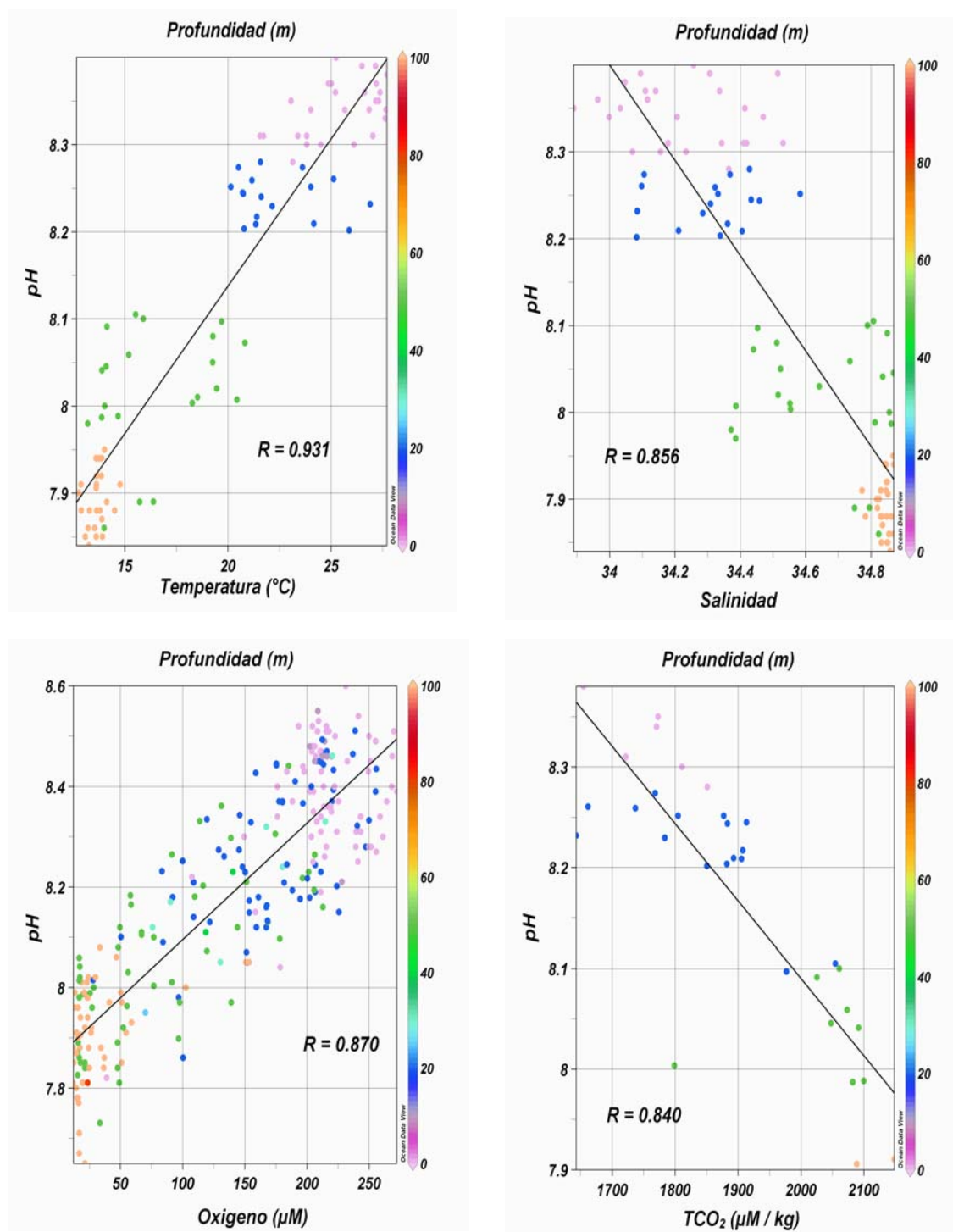
El pH mostró la relación directa de distribución en la vertical a lo largo de la columna de agua de 0 - 2,500 m de profundidad, que tiene con las variables de temperatura, oxígeno y la relación inversa con la salinidad (Fig.8.6.5a).

La relación del pH con la temperatura y oxígeno, mostraron el perfil típico de distribución en la zona eutrófica (0-100 m), con máximos superficiales y disminuyen conforme la profundidad (Fig.8.6.5b), pero en aguas más profundas la relación cambia. De acuerdo al promedio calculado de los valores obtenidos a los 1,500 m de profundidad, el pH tendió a aumentar asociado al incremento de concentración de oxígeno (Fig.8.6.5a).

El  $R^2$  de distribución del pH a lo largo de la columna de agua de la zona eutrófica, indicó una  $R^2=0.931$  con la temperatura;  $R^2=0.856$  con la salinidad;  $R^2$  de 0.87 con el oxígeno y  $R^2$  de 0.84 con el  $\text{TCO}_2$  (Figs.8.6.6).



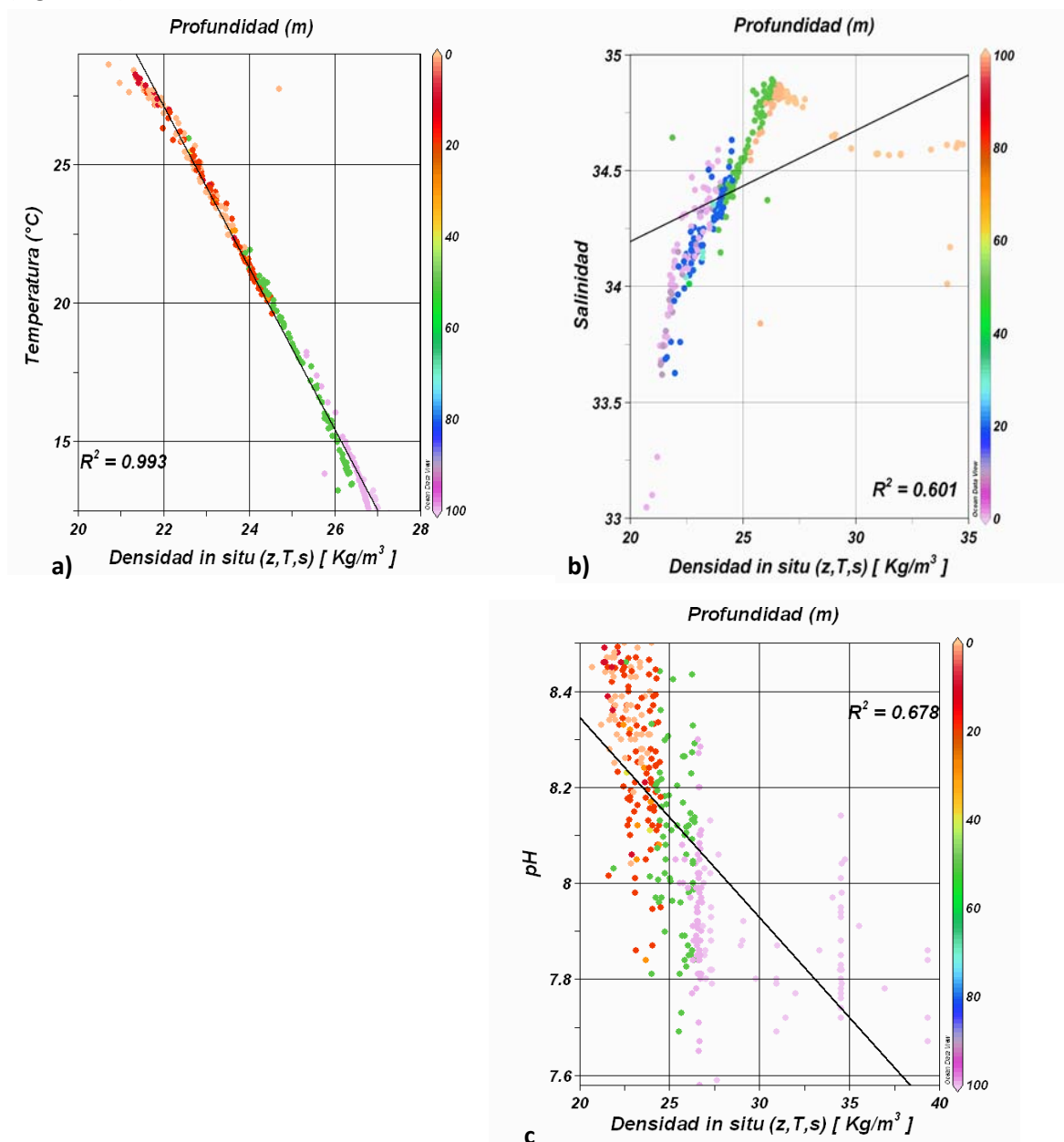
**Figura.8.6.5.** Relación de distribución vertical de temperatura, salinidad, oxígeno y pH, de acuerdo a los valores promedio de cada estrato de agua muestreada. a) En toda la columna de agua; b) en la zona eutrófica (0 a 100 m).



**Figura.8.6.6.** Relación de distribución vertical de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y dióxido de carbono total, con respecto al pH en la zona eutrófica del GT.

### 8.6.4 Relación pH — Densidad

La relación de la temperatura con respecto a la densidad (0.993) fue mayor que la de densidad-salinidad (0.601). La relación de la densidad con el pH mostró un  $R^2$  baja de 0.678 (Figs.8.6.7).



**Figura.8.6.7.** Relación de distribución vertical de la densidad con la temperatura, salinidad y pH, en la zona eutrófica del GT.

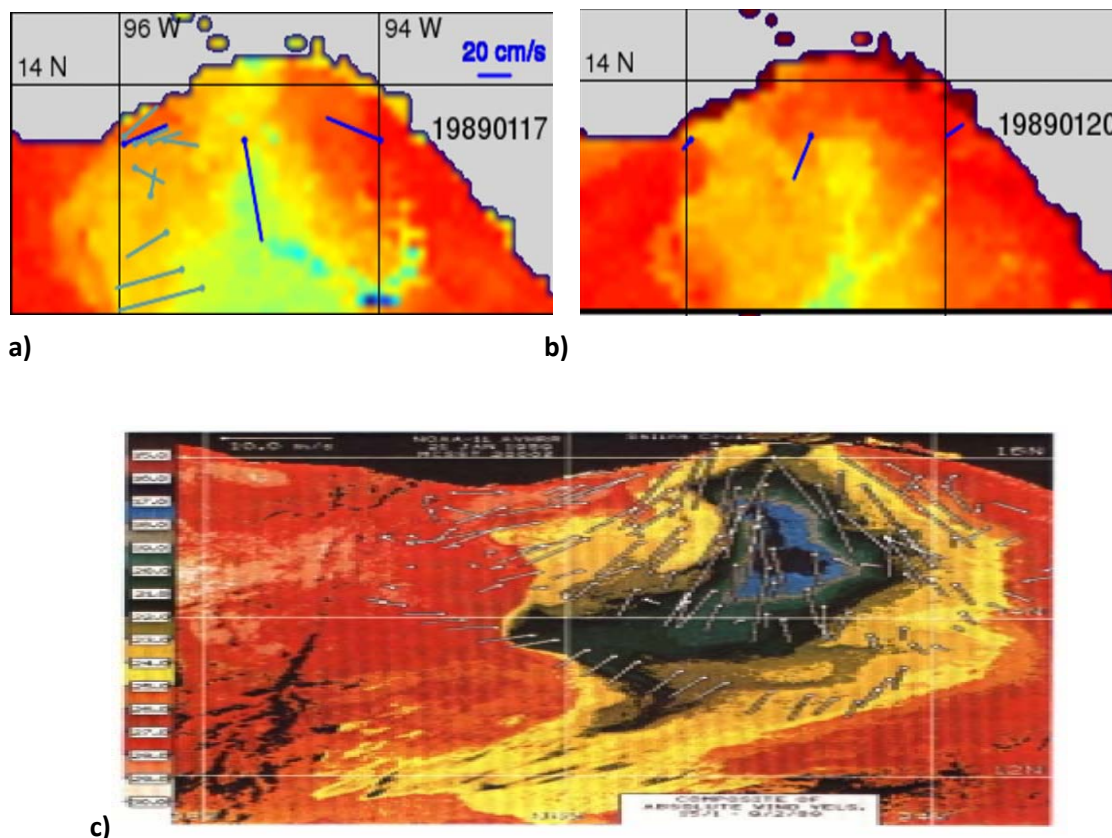
## **9. DISCUSIONES**

### **9.1 Temperatura**

#### **9.1.1 Análisis en la superficie; comparación con Tehuanos I.**

##### **a) Formación de una franja de agua fría como producto del Tehuano**

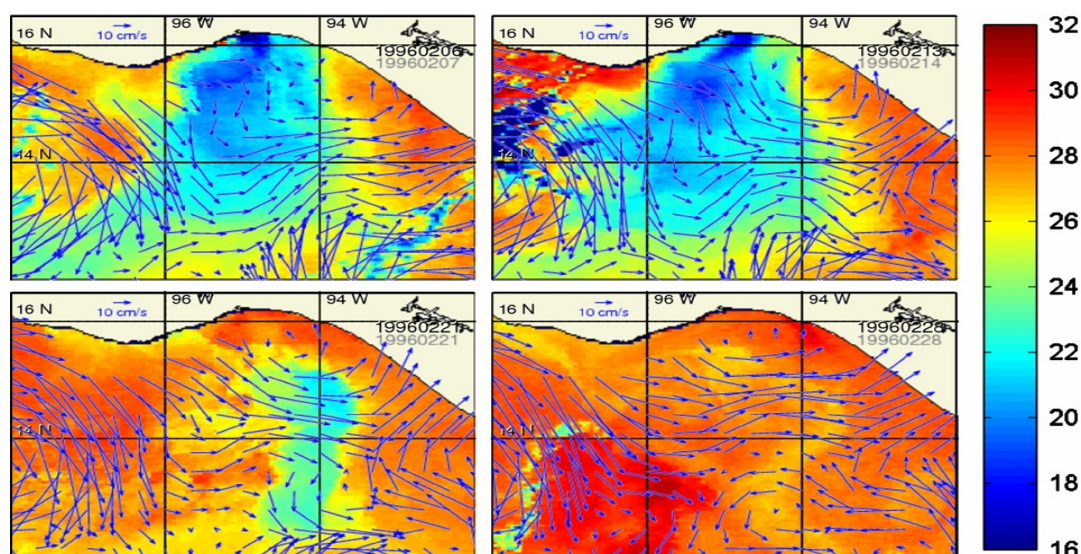
El origen, elongación y trayectoria que siguió la franja de agua fría durante Tehuanos II, fue producto de la variabilidad en la dirección, velocidad y magnitud con la que los vectores del viento adoptaron al momento de soplar sobre la superficie del GT. De acuerdo a Quijano Roviroso (2007), es la variabilidad y la rotacional del viento los componentes vectoriales que indican el lugar de origen y el desplazamiento que toma la franja de agua fría, mientras que la magnitud de la velocidad determina la extensión. Por tanto, al tener que la dirección de los Nortes están ligados directamente con la orografía en las cercanías del GT, al momento en el que estos llegaron a soplar lo hicieron en sentido tierra-mar (cosa que es única en el litoral mexicano), cuya magnitud máxima de velocidad y variabilidad recayó en las inmediaciones del Golfo, lo que hizo que los vectores de viento se distribuyeran en forma de abanico cubriendo toda la zona del GT (Fig.9.1.1c), dejando a sus costados valores medios de intensidad (Trasviña Castro<sup>3</sup>; Quijano Roviroso, 2007).



**Figura.9.1.1** Imágenes satelitales obtenidas para la campaña Tehuanos I de 1989, que muestran el remanente de un evento anterior al Tehuano del 21 de enero. **a)** Imagen del 17 de Enero. **b)** Imagen del 20 de Enero. (Ambas imágenes obtenidas de Barton *et al.*, 2009). **c)** Imagen correspondiente al Tehuano del 21 de Enero (Trasviña-Castro<sup>3</sup>).

La respuesta del océano ante los máximos de viento generó un hundimiento en el nivel de mar, que pudo o no producir surgencia cerca de la costa. Los máximos valores de hundimiento en el nivel de mar (NM), se traducen en la observación de una franja al Centro del GT de alta variabilidad, la cual estuvo orientada en el mismo sentido que los Tehuanos (Norte-Sur) (Quijano Roviroso, 2007).

Las imágenes obtenidas por satélite para las campañas Tehuanos II y Tehuanos I, muestran que el origen de la franja de agua fría se dio al Centro en la cabeza del Golfo, justo por debajo del eje de máxima velocidad del viento, extendiendo la franja de agua fría a lo largo de los 95°W, hasta los 450 Km de distancia para Tehuanos II (Fig.9.1.2) (Trasviña *et al.*, 2003) y 400 Km mar afuera alcanzando los 200 Km de ancho en el golfo central, para Tehuanos I (Fig.9.1.1) (Trasviña y Barton, 1997).



**Figura.9.1.2** Imágenes de satélite obtenidas para la campaña Tehuanos II (Barton *et al.*, 2009) correspondientes al 6, 13, 21 y 28 de Febrero de 1996.

La temperatura de Tehuanos II registrada por las imágenes de satélite (Fig.9.1.2) mostró un intervalo de 16° - 25°C dentro de la franja y fuera de ella de 26° a 32°C (Barton *et al.*, 2009); mientras que la imagen compuesta a partir de los datos obtenidos *in situ*, indicaron temperaturas de 21° - 25°C dentro de la franja y de 27° - 29°C fuera de ella (Fig.8.1.1). En comparación con las temperaturas encontradas durante Tehuanos I (Fig.9.1.1), se registraron de 16° - 25°C dentro de la franja de agua fría, con un mínimo cerca de 14.5°N, 95.5°W; fuera de

la franja se registraron temperaturas de 28° - 30°C, con una velocidad de viento de 17 m/s por cerca de 18 hrs. (Trasviña y Barton, 1997).

La temperatura mostrada por la imagen *in situ* y por satélite para ambas campañas indicó un notable decremento en la temperatura, de hasta 14° o 15°C, considerando el mínimo y el máximo detectado en la zona.

La diferencia de los resultados *in situ* con respecto a las imágenes de satélite, en especial si se compara con la Fig.9.1.2 que corresponde a la misma campaña de Tehuanos II, es atribuible a que la imagen *in situ* ha sido compuesta a partir de datos que tomaron alrededor de un mes codificarlos (tiempo que tarda un crucero para ser completado), mientras que las imágenes satelitales han mostrado que cambios muy importantes pueden tomar lugar en materia de horas (Barton *et al.*, 2009). Esto es comprobable al observar la imagen de satélite para Tehuanos II en Febrero 21 (Fig.9.1.2) y la imagen compuesta con los datos *in situ* (Fig.8.1.1), se encuentra que existe una semejanza en la dispersión de la franja de agua fría, el inicio de las entradas de agua cálida y el intervalo de temperatura (21° - 30°C). Esto indica que los valores *in situ* se adquirieron una vez que los vientos empezaron a relajarse (del 16 - 27 de febrero de 1996), lo que permitió la entrada de las aguas cálidas más hacia la cabeza del Golfo y registrar las temperaturas finales mínimas del efecto del Tehuano.

#### **b) Trayectoria de la franja de agua fría**

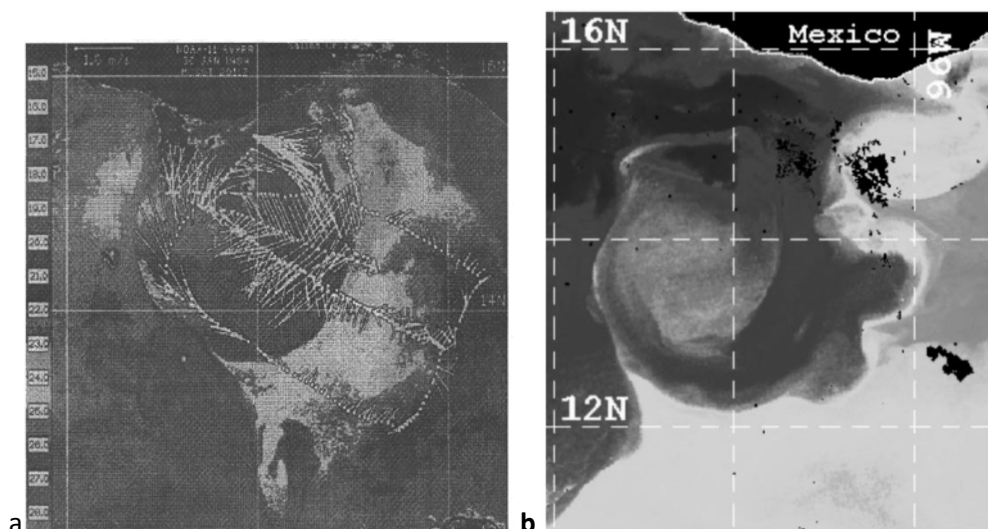
La circulación que tienden a seguir la franjas de agua fría después del Tehuano dentro del GT, es perceptible por las imágenes de satélite que se registraron para Tehuanos I y

Tehuano II (Figs.9.1.1 y 9.1.2), ya que las figuras con datos de temperatura *in situ* están limitadas al área muestreada sin poder extrapolar.

La trayectoria de la franja de agua fría al momento de separarse de la costa fue condicionada por la rotacional de viento, la cual a su vez debe su desviación al efecto Coriolis, que de acuerdo a su definición, desvía a las corrientes como a las masas de aire, a la derecha en el Hemisferio Norte **(HN)** y a la izquierda en el Hemisferio Sur **(HS)** <sup>(4)</sup>. Por lo tanto, debido a que en un principio en las cercanías a la costa la rotacional es casi igual a cero, por un balance geostrófico indicativo de uniformidad espacial del viento (Quijano Roviroso, 2007), se observa que la franja de agua fría siguió una dirección sur perpendicular a la racha del viento, pero una vez que se encontró mar adentro, se desvió hacia la derecha debido al efecto Coriolis, por lo que cambió en dirección Suroeste.

### c) **Formación de un giro anticiclónico; dinámica del GT.**

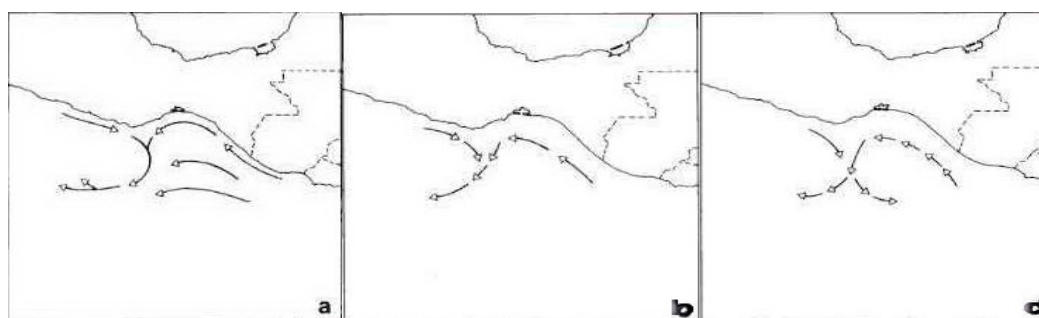
La curvatura que formó la franja de agua fría por parte de su frontera sur varios kilómetros mar adentro y es perceptible en las imágenes de satélite y levemente en la de *in situ*, es debido a la formación de un remolino anticiclónico. Este ha sido resultado de la intensificación de la rotacional del viento, que hizo que la trayectoria de la franja de agua fría se encontrara con aguas cálidas provenientes del Oeste, llegando a formar un frente térmico que indujo la generación del giro anticiclónico, estimado con 300 Km de diámetro para la campaña Tehuano II (Fig.9.1.3b), formado casi una semana antes del primer arribo de las embarcaciones sobre el área (Trasviña *et al.*, 2003). En Tehuano I el giro anticiclónico fue de 200 Km de diámetro y 120 m de profundidad, el cual estuvo completamente desarrollado el 30 de Enero (Fig.9.1.3a).



**Figura.9.1.3.** Imágenes del remolino anticiclónico detectados en infrarrojo (AVHRR), como producto del frente térmico entre el desplazamiento de la cuña de agua fría originado por los Tehuanos y las aguas cálidas propias del GT. **a)** Imagen para Tehuano I, Enero 30 de 1989, los vectores de corriente superpuestos en la imagen, muestran el giro cálido (Trasviña y Barton, 1997). **b)** Imagen para la campaña Tehuanos II, Febrero 11 de 1996 (Trasviña *et al.*, 2003).

En las imágenes superficiales (*in situ* y satelital), se observa como la trayectoria de la franja que llevó un gradiente de temperatura muy notorio, se vio limitada al sur por un suave cambio horizontal de temperatura del agua superficial, haciendo evidente la difusión horizontal del calor, ya que los vientos del Norte redujeron su intensidad y empezaron a tener presencia los vientos Alisios, por lo que las características normales de la circulación se restablecieron y el transporte hacia el sur se detuvo. El límite de la franja de agua fría en el Oeste se debió a su migración, pues esta actuó como una barrera al desplazamiento del agua superficial más caliente paralelo a la costa y por último, su límite del lado Este fue debido por la compensación de aguas cálidas (Gallegos-García y Barbarán-Falcón, 1998).

La circulación superficial en el GT a finales de la época de Nortes (Febrero a Abril), corresponde cuando se realizó Tehuanos II, y presentó un patrón de circulación similar al descrito por Monreal-Gómez y Salas de León, (1998), durante invierno que es la de reintensificación de Tehuanos, donde se presentan dos patrones de circulación muy similares entre sí: En Octubre-Enero correspondería a Tehuanos I, la circulación mostró dos corrientes paralelas a la costa y en sentido contrario (una proveniente del Oeste y otra del Este), las cuales se encontraron a la altura de Salina Cruz. La rapidez de la corriente en la parte alta del GT es inferior a la de la región sur, una vez que dichas corrientes convergen siguieron una trayectoria hacia mar adentro (400 Km de acuerdo a la extensión de la franja de agua fría), donde la corriente cambió de dirección hacia el Suroeste (Figs.9.1.4a y b).



**Figura.9.1.4.** Corrientes superficiales en el GT de acuerdo a Roden (1961). **a)** Época de Nortes. **b)** De Octubre a Enero; **c)** De Febrero a Abril. (Líneas cortas identifican velocidades menores a 20 cm/s y las líneas largas mayores a 20 cm/s) (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).

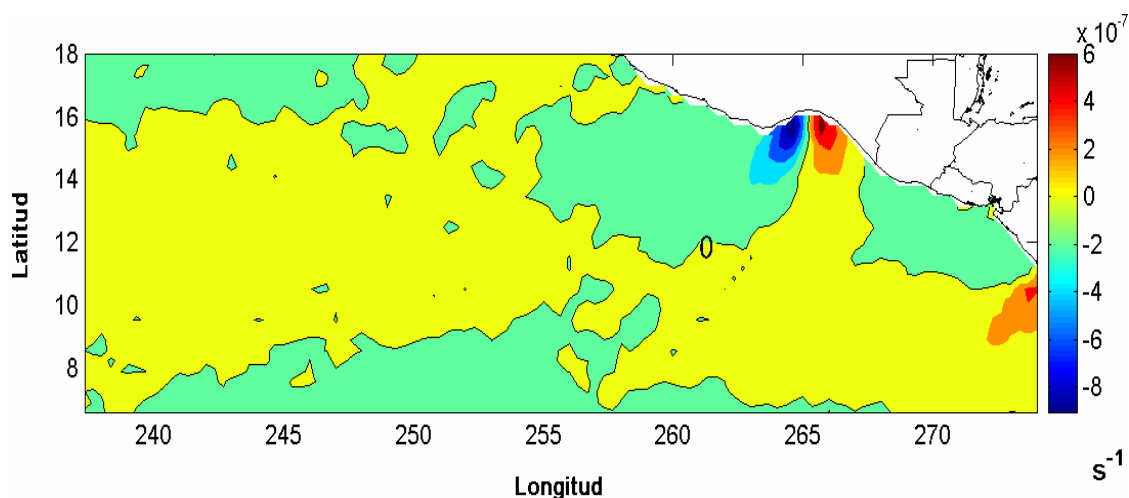
La dinámica del agua de Febrero a Abril que corresponde a la fecha en la que se realizó Tehuanos II, se presentó un patrón de circulación similar al anterior, con la diferencia que la contribución Noroeste se volvió más importante que la del Norte y una vez que las corrientes convergen, se formaron dos celdas, desarrollándose un dipolo que conllevó a la generación de

un giro anticiclónico en la porción del Oeste, y un giro ciclónico en la parte oriental del golfo (Fig.9.1.4c) (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).

La intensificación de la rotacional del viento explica la dinámica sucedida al interior del GT, la cual muestra una anti simetría entre lo que sucede al Oeste y al Este durante los Tehuanos (Fig.9.1.5). El cambio de signo de la rotacional del viento indica la ubicación de la discontinuidad de la cordillera, donde variabilidad de la rotacional negativa (Oeste) es mayor que la positiva (Este), con una relación indirecta pues al intensificarse el rotacional negativo, el rotacional positivo aumenta, demostrando que dicho valor no depende de la velocidad del viento, si no de su distribución espacial (Quijano Roviroso, 2007). La detección de una correlación negativa entre la componente V del viento y el NM, en la zona Oeste, parece indicar una probable generación del remolino anticiclónico, debido al efecto del rotacional negativo del viento el cual se ve reflejado como una elevación del NM, por la afluencia de los vientos alisios. Mientras que la correlación positiva en la zona Este, se traduce como una depresión del NM, debida a la generación de remolinos ciclónicos por el rotacional positivo del viento.

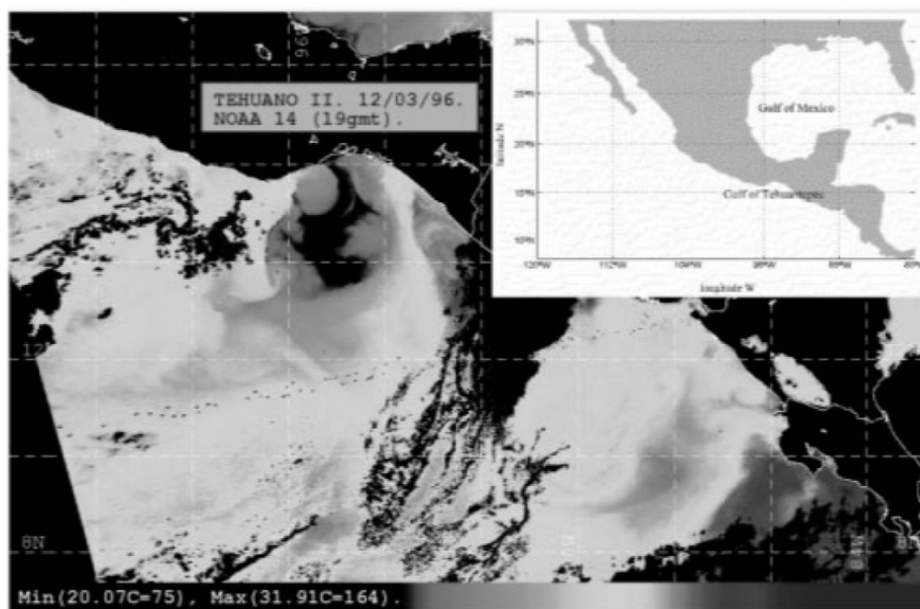
#### **d) Tiempo de vida del Tehuano y de su efecto.**

Si tomamos en cuenta que en la campaña Tehuanos II se encontraba el Tehuano, y de acuerdo a la imagen de satélite del 7 de Febrero (Fig.9.1.2) se iniciaba, con una reintensificación entre el 14 y 15 pero debilitándose el 16 del mismo mes. Entonces suponemos que el evento tuvo una duración de ocho días, ya que no contamos con datos de velocidad de viento.



**Figura.9.1.5.** Rotacional del viento analizada por Quijano Rovirosa (2007). El cambio de signo de la rotacional indica la discontinuidad de la cordillera, mostrando que la rotacional negativa tiene mayor variabilidad, induciendo la formación de un giro anticiclónico sobre el lado Oeste, que la rotacional positiva, induciendo una circulación ciclónica sobre la parte Este del golfo.

En la campaña Tehuanos I, el tiempo aproximado que duró el Tehuano fue tres días, ocurrió con la máxima intensificación de viento el 21 de Enero y desapareció abruptamente el 24, casi de la misma forma en la que apareció, con velocidades menores a 10 m/s (Trasviña y Barton, 1997). Por tanto, mientras el Tehuano duro entre tres y ocho días, de acuerdo a la secuencia de las imágenes la evolución de su efecto sobre la superficie tuvo un periodo de vida aproximado de tres semanas, antes de que se iniciara un nuevo evento de viento, que puedo ser de menor o mayor intensidad a su antecesor. Como ejemplo está la Fig.9.1.6, capturada el día 12 de Marzo de 1996, muestra lo que fue el evento inmediatamente después a la campaña Tehuanos II y en la cual se observa su máxima intensidad.



**Figura.9.1.6** Imagen de satélite de un evento subsecuente al evento de viento en Tehuanos II, detectado en Marzo 12 de 1996 (Trasviña *et al.*, 2003).

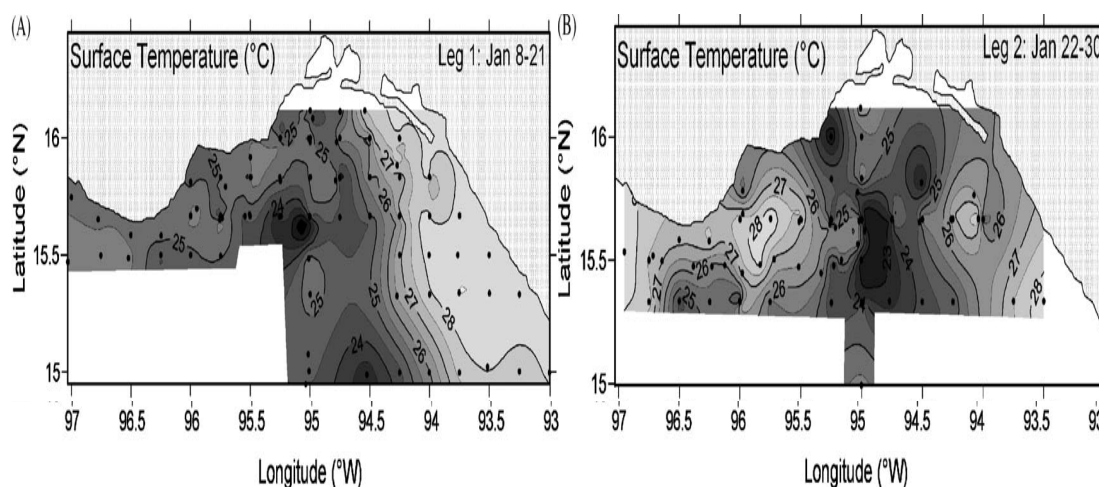
#### e) Temperatura *in situ*.

En las cantidades *in situ* de temperatura y salinidad diferimos con Barton *et al.* (2009), ya que reportan una temperatura superficial máxima de 28°C, igual que la obtenida durante Tehuanos I y un mínimo de 24°C; un máximo de salinidad de 34.3, un mínimo de 33.7 para ambos cruceros y con un máximo de salinidad de 34.4 para Tehuanos I. Sugiere que el viento estuvo fuerte durante Tehuanos I, o que el área fue rápidamente remplazada después del evento de viento de Tehuanos II, en lo que diferimos, ya que si consideramos el grado de temperatura y salinidad superficial como medidas indirectas de la intensidad de un evento de viento, tal y como lo hicieron ellos, entonces sugerimos que el evento de viento de Tehuanos II fue más fuerte que el evento de viento de Tehuanos I, ya que se encontró una temperatura máxima superficial de 29.12°C y un mínimo de 21.24°C, una salinidad máxima de 34.59 y

mínima de 33.04 (Tab.VIII.1.1). Sugerencia que se ve reforzada en el análisis en la vertical al encontrar las termoclinas a menor profundidad que las halladas durante Tehuanos I.

La diferencia entre las cantidades de temperatura y salinidad entre Barton *et al.*, (2009) y este trabajo, aunque se refiera a la misma campaña oceanográfica, es atribuible a lo obtenido en diferentes bases de datos.

La temperatura superficial siguió el patrón de circulación del GT, por eso se encontraron temperaturas más frías dentro de la franja, fuera de ella (a sus costados) las máximas en la zona Este ( $26^{\circ}$  -  $29.12^{\circ}\text{C}$ ) y Oeste ( $26^{\circ}$  -  $27.71^{\circ}\text{C}$ ) (Fig.8.1.1; Tab.VIII.1.2). En contraste con Tehuanos I, donde sus máximos superficiales se reportaron en la zona Oeste y Este con temperaturas de  $26^{\circ}$  -  $28^{\circ}\text{C}$  (Fig.9.1.7b).



**Figura.9.1.7.** Distribución de las temperaturas superficiales *in situ* ( $^{\circ}\text{C}$ ). **(A)** Tehuanos I, del 8-21 de Enero, antes del evento de viento y **(B)** después del evento de viento (21 de Enero), mostrando las isothermas del 22 - 30 de Enero (Farber-Lorda *et al.*, 2004).

En Tehuanos II, la entrada del agua cálida en la zona Este se hizo más difuso hacia el área costera de la cabeza del Golfo, en comparación con Tehuanos I. El efecto del Tehuano

durante la campaña Tehuanos II, tuvo más incidencia hacia el Oeste de la cabeza del Golfo que durante Tehuanos I, esto fue perceptible por el desprendimiento de agua fría que mostró la imagen *in situ*, transportó temperaturas de 24° - 25°C (Fig.8.1.1).

Las isotermas de 26°C, que es la más visible en la imagen de Tehuanos I (Fig.9.1.7b), localizada entre los 15.5°N, 95.5°W y 15°N, 96°W en Tehuanos II, muestra que durante éste se entrampó lejos de la costa una menor área de agua menos cálida, que durante Tehuanos I. Esto hace dudar del diámetro del giro anticiclónico reportado para Tehuanos II, ya que supone que cuando el remolino madura, su extremo norte es el motor de la corriente costera.

Los periodos de entrada de la corriente están asociados con los Nortes, con el flanco cerca de la costa de los remolinos anticiclónicos generados por los Tehuanos y su variabilidad es correlacionada con los vientos frente a Salina Cruz (Barton *et al.*, 2009). Por tanto, de acuerdo al efecto del viento más al Oeste del Golfo, que tuvo durante Tehuanos II y en consecuencia un pronto desplazamiento de la franja de agua fría en dirección Salina Cruz, así como el diámetro de 300 Km del remolino anticiclónico (Trasviña *et al.*, 2003), se esperaría que el remolino anticiclónico hubiese entrampado una mayor área y agua más cálida proveniente del Oeste. Caso que sí sucedió con el remolino de Tehuanos I, con un diámetro de 200 Km (Trasviña y Barton, 1997).

La imagen del remolino anticiclónico de Tehuanos II fue obtenida durante el evento de viento (Fig.9.1.3b), mientras que la imagen de Tehuanos I, en la que se basaron para obtener el diámetro final de giro, fue adquirida casi nueve días después del evento, el 21 de Enero (Figs.9.1.3a). Por lo cual se esperaría que debido a la relajación de los vientos en Tehuanos I, el remolino anticiclónico hubiese entrampado menos flujo de entrada de agua cálida procedente

del Oeste que en Tehuanos II. Esta observación se vio reforzada con el hundimiento a menor profundidad de la termoclina, mostrada por el transecto Oeste de Tehuanos II, que la reportada en Tehuanos I.

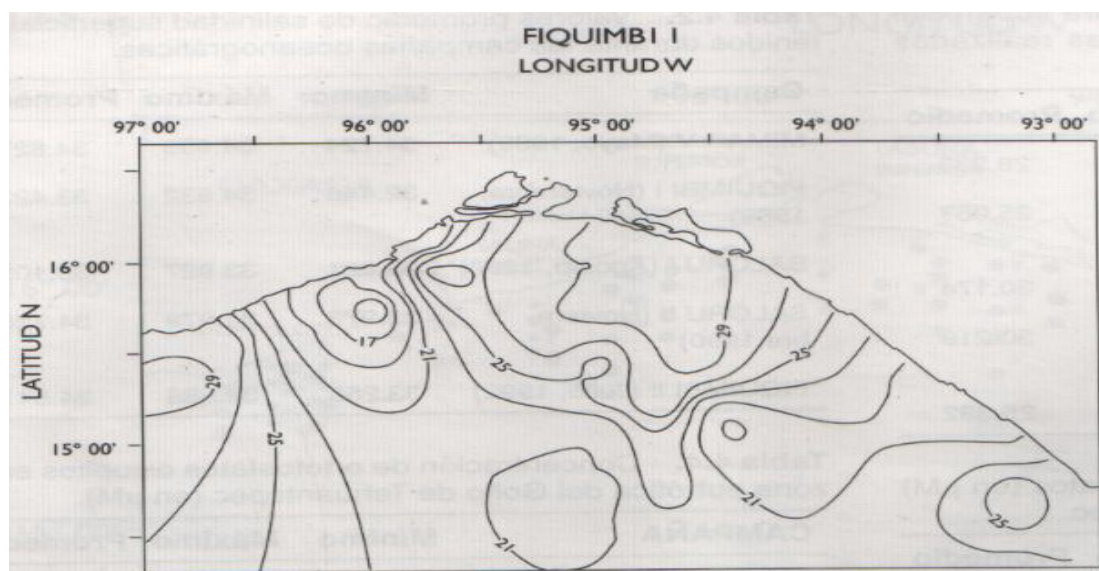
En Tehuanos I la imagen que muestra del 8 - 21 de Enero es antes y durante el evento del 21 de Enero (Fig.9.1.7a), permitió comparar el gradiente de temperatura que hubo en el GT después de presentarse un Tehuano, con respecto a la imagen del 22-30 de Enero (Fig.9.1.7b) de la misma campaña y con la imagen del 16-27 de Febrero de Tehuanos II (Fig.8.1.1). Esto dio como resultado en Tehuanos I un enfriamiento aproximado de 2°C, ocasionado por la mezcla de vientos y un bombeo de Ekman, ocurrida en el Centro y Este de la región, mientras que en el Oeste hubo un calentamiento de casi 2°C, especialmente cerca de la costa, debido a la convergencia del transporte de Ekman, al entrampamiento de los giros y la intrusión de una corriente costera a lo largo de la costa (Farber-Lorda *et al.*, 2004). Mientras que para Tehuanos II se mostró lo contrario, un enfriamiento promedio del Centro y Oeste con 2°C de diferencia, y en la zona Este un calentamiento de 1°C.

### **9.1.2 Análisis en la superficie; comparación con otras campañas oceanográficas**

Comparando con otras campañas oceanográficas que obtuvieron datos *in situ* (Tab.IX.1.1), se encontró mayor semejanza de Tehuanos II (Febrero) con los promedios y máximos superficiales reportados de FIQUIMBI I (Noviembre) y FIQUIMBI II (Julio) que con Tehuanos I (Enero-Febrero). En ambas campañas se obtuvo un promedio general de 25° - 26°C con máximos de 29°C, ubicando su núcleo de menor temperatura así como las isothermas menores a 25°C, ligeramente desplazado hacia el Oeste (Fig.9.1.8).

**Tabla.IX.1.1** Valores de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en las campañas oceanográficas realizadas entre Mayo de 1989 - Julio de 1992 en el GT. (Vázquez-Gutiérrez *et al.*,1998).

| Campaña Oceanográfica       | Mínimo | Máximo | Promedio |
|-----------------------------|--------|--------|----------|
| MIMAR V (Mayo,1989)         | 26.500 | 29.510 | 28.333   |
| FIQUIMBI I (Noviembre,1989) | 18.315 | 29.498 | 25.057   |
| SALCRU I (Agosto,1990)      | 28.189 | 31.111 | 30.174   |
| SALCRU II (Noviembre,1990)  | 26.760 | 31.710 | 30.219   |
| FIQUIMBI II (Julio,1992)    | 16.920 | 29.710 | 26.392   |



**Figura.9.1.8.** Variación de la temperatura superficial (5 m de profundidad), obtenida durante la campaña FIQUIMBI I (Vázquez-Gutiérrez *et al.*,1998).

La imagen correspondiente a FIQUIMBI II no se puso por falta de veracidad en la distribución de los resultados reportados en la superficie, no concuerdan con las isopletas mostradas por la imagen, sin embargo, se menciona que debido a la baja intensidad de los vientos durante la época de verano (FIQUIMBI II) y a la mayor intensidad luminosa (Roden,

1961; Salvador, 1993), los valores altos de temperatura se observaron en la zona costera mientras que en mar abierto los valores fueron ligeramente menores (Salvador, 1993).

La isoterma de los 25°C que fue considerada como la limitante entre la franja de agua fría y las aguas adyacentes propias del Golfo en Tehuanos II, también se consideró por la campaña FIQUIMBI I por el promedio general de temperatura de 25.057°C (Tab.IX.1.1). En ambos cruceros se encontró, como después de un Tehuano, las aguas cálidas provenientes del Este y Oeste, encerradas por la isoterma de 25°C, evidenciaron la curvatura que entrampó el agua cálida del Oeste como producto del desplazamiento del remolino anticiclónico. Es por eso que a estos giros también se les conoce como remolinos cálidos (Fig.8.1.1; Fig.9.1.8).

El intervalo de temperatura así como la ubicación de las isotermas más frías, encerradas por la isoterma de 25°C, hacen suponer de la campaña FIQUIMBI I que fue un evento de viento con intensidad mayor al de Tehuanos II, lo cual sería lo más razonable a juzgar por la fecha en la que se realizaron ambas campañas. Sin embargo, SALCRU II fue realizado en el mismo mes de FIQUIMBI I (Noviembre) y guarda una relación con respecto al intervalo de valores químicos con Tehuanos II.

El SALCRU II, al considerar la fecha en la cual se realizó, se esperarían valores más bajos de temperatura ya que presentó un intervalo de 26.76° - 31.71°C, los cuales corresponden más al intervalo de temperaturas encontradas durante MIMAR V (26.5° - 29.51°C) y SALCRU I (28.19° - 31.11°C), que corresponden al mes de Mayo y Agosto para la temporada de primavera-otoño (Tab.IX.1.1).

El intervalo de temperatura en SALCRU II, hace parecer un evento de menor intensidad que Tehuanos II, sin embargo, es la campaña con más relación en el intervalo de valores

químicos encontrados durante la temporada de apogeo de Tehuanos. También Tehuanos II tuvo una relación más estrecha con respecto a la distribución de los parámetros de FIQUIMBI II, campaña realizada en el mes de Julio, fecha en la que se registran ligeras reintensificaciones de los Tehuanos, que aunque son de menor intensidad, llegan a alterar el sistema de forma moderada.

Las campañas FIQUIMBI I y SALCRU II, aunque fueron realizadas durante el mismo mes pero en diferente año, en la segunda reportaron valores ligeramente más altos o bajos dependiendo del parámetro medido y sugieren que corresponden a un evento de viento de mayor intensidad. Por lo que hace suponer que el área del GT fue rápidamente remplazada por las aguas cálidas propias del Golfo al reportar un intervalo de temperatura mayor a FIQUIMBI I.

### **9.1.3 Análisis general en la Vertical; comparación con Tehuanos I.**

La estructura de distribución en la vertical que siguió la temperatura, dependió de la penetración de las radiaciones solares. Los cambios hidrológicos que se dieron en la superficie también se extendieron en la vertical, solo que además de jugar un papel en las coordenadas de un plano (x, y), también lo hizo con la profundidad (z).

La penetración de la radiación solar dependió principalmente de la turbulencia del agua, es decir, de la cantidad de materia sólida que se encontrara en suspensión (Cifuentes Lemus *et al.*, 2003). Para el caso de las aguas tropicales, las radiaciones que llegan a la superficie penetran la masa de agua, alcanzando una homogeneidad entre los 100 y 200 m de profundidad que confieren la zona eutrófica de la columna de agua, dependiendo de las condiciones locales y son relativamente estables durante un año. Por debajo de esta zona se

encontraría la *termoclina*, que divide a estas aguas superficiales menos densas y menos salinas, de las aguas profundas más frías, densas y salinas (Cifuentes Lemus *et al.*, 2003).

En el GT cuando se presentó el Tehuano, el esquema de un estrato homogéneo o casi homogéneo se rompió, ya que la termoclina típica de 50 m reportada por Stumpf (1975) y encontrada durante Tehuanos I (1989) antes de dicho evento, delimitada por la isoterma de los 18°C (Farber-Lorda *et al.*, 2004), tuvo una mayor variabilidad de desplazamiento que en los meses de primavera-otoño (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

La isoterma de 18°C que se consideró en Tehuanos II en base a Tehuanos I para delimitar la profundidad promedio anual de la tapa de termoclina del GT, encontró a los 50 m de profundidad la termoclina general del Golfo después del Tehuano, y también la deformación de la cresta de la termoclina definida desde las primeras expediciones al Golfo, concordando con lo hallado durante Tehuanos I (Trasviña y Barton, 1997). En la zona Este la termoclina no llegó a la superficie, como podría esperarse por la divergencia del flujo horizontal o bombeo de Ekman, y según el modelo de Crepon *et al.*, (1982). En vez de esto, en Tehuanos I la termoclina se encontró entre 5 y 10 m más profunda que antes del evento (Trasviña y Barton, 1997), mientras que en Tehuanos II la termoclina se encontró a los 50 m de profundidad. Esto sugiere que si bien existió una surgencia debida a las fuertes rachas de viento, ésta no llegó a florecer en su totalidad hacia la superficie, sino mas bien, el enfriamiento superficial del GT fue resultado de una fuerte interacción de mezcla entre la capa de agua subsuperficial enriquecida por una surgencia (que puede ser de gran o menor tamaño), y el agua superficial del Golfo.

En general, una vez localizada la termoclina cuando en los océanos se alcanzan profundidades de 1,500 m a mayores, la temperatura del agua puede ser menor de 4°C, en cualquier parte del mundo, independientemente de la profundidad (Fig.8.1.2; Tab.VIII.1.1a) (Cifuentes Lemus *et al.*, 2003).

#### **9.1.4 Análisis en la vertical por transecto; comparación con Tehuanos I**

- **Transecto Oeste**

En el transecto Oeste, si consideramos que antes de un evento de viento la termoclina se hallaba a 50 m de profundidad, entonces en la zona costera se comprimió y se hizo más superficial. Mientras que por efecto del avance del giro anticiclónico, la termoclina se hundió varios metros, como una indicación del alcance de la mezcla vertical del jet de viento (Trasviña y Barton, 1997), y del entrampamiento del flujo de la fuerte corriente del Oeste hacia el Este, asociada con la periferia norte del remolino anticiclónico (Barton *et al.*, 2009).

El volumen de agua cálida entrampada por el remolino anticiclónico, ocupó un espesor de 80 m de profundidad, si tomamos en cuenta el centro de la termoclina de las isothermas de 16° - 18°C de Tehuanos I. En cambio, si consideramos el centro de la termoclina de las isothermas de 18° - 21°C de Tehuanos II, entonces el agua entrampada por el remolino ocupó un volumen mucho menor (40 m) (Fig.9.1.1a). En cualquier caso, el volumen entrampado por el giro anticiclónico de Tehuanos II, fue menor que aquel entrampado por el remolino de Tehuanos I que hundió la termoclina hasta los 100 m (Trasviña y Barton, 1997), aunque Farber-Lorda *et al.*, (2004) reportan que la termoclina llegó solo a una profundidad de 60 - 70 m.

- **Transecto Centro**

La entrada del agua cálida proveniente del Este, estuvo limitada en la zona costera del GT y disminuyó su extensión conforme se alejaba de ella, se debe a la forma que adopta los vectores de viento al extender su velocidad hacia el sur como abanico cubriendo toda la zona del GT (Fig.9.1.1b). Por ello la distribución de la termohalina se encontró dominada por la rotacional del viento, que hizo que las temperaturas superficiales más bajas no se produjeran donde dicha velocidad fuese máxima, pues ahí la rotacional del esfuerzo del viento es cero, sino donde la picnoclina fue más somera (Quijano Rovirosa, 2007).

El ancho del agua fría fue mayor en el sur del GT que dentro, característica que se observó en las imágenes superficiales y es verificada en la vertical. Esto sugiere que el efecto de surgencia fue contrarrestada parcialmente por el arrastre lateral de agua caliente cerca de la costa (Gallegos-García y Barbarán-Falcón, 1998).

En Tehuanos II, la termoclina subió hasta los 40 m de profundidad, mientras que en Tehuanos I, la termoclina en la zona Centro alcanzó a subir hasta los 60 m (Trasviña y Barton, 1997). Ambas termoclinas fueron ubicadas por debajo del eje del viento, por lo que se define a la zona Centro como la zona dominada por una mezcla de vientos, la SST es baja y las isothermas de termoclina son extendidas en la vertical (Farber-Lorda *et al.*, 2004).

- **Transecto Este**

En el transecto Este, al contrario del transecto Oeste, se observó el hundimiento de la termoclina en la zona costera. El entrampamiento de agua cálida  $>29^{\circ}\text{C}$  y ligera con salinidades  $<33$ , son propias de la masa de agua proveniente del Sureste, acarreada por el flujo de la Corriente Costera de Costa Rica (Trasviña y Barton, 1997). Fue atrapada nuevamente en la costa por encima de la termoclina, al igual que en la zona Centro, pero ahora este

entrampamiento no solo se dio en la capa de mezcla superficial, si no que se hundió varios metros como posible consecuencia de la formación de un giro anticiclónico de gran tamaño, ya que éstos son capaces de atrapar y transportar grandes cantidades de agua cálida, cuya estructura vertical está delimitada por una termoclina cóncava, alcanzando desde la superficie de su periferia y en el centro, 200 m de profundidad, girando a velocidades de hasta 1 m/s y se propagan hacia fuera de la costa a velocidades típicas de 9 Km/d (Trasviña Castro<sup>3</sup>).

En este estudio, de acuerdo a la profundidad alcanzada por la termoclina, podemos sugerir que la periferia del remolino anticiclónico formado en la zona costera oriental durante Tehuanos II, tuvo un alcance de 100 m de profundidad (Fig.9.1.1c). Cabe mencionar que no todos los remolinos anticiclónicos son generados en la costa y que no todos son como producto del forzamiento del viento sobre la superficie del océano, sino que también pueden ser creados por ondas internas atrapados en la costa o inestabilidades (Cifuentes Lemus *et al.*, 2003; Quijano Roviroso, 2007).

La periodicidad de formación de los giros anticiclónicos no es muy común en la zona Este, ya que esta zona se encuentra sujeta a una circulación ciclónica. Así que es común la formación de remolinos ciclónicos, pero debido a las fuertes rachas de viento de los Tehuanos, esta circulación ciclónica se debilita (como se visualiza en la Fig.9.1.5 de la rotacional negativa del viento, superior a la rotacional positiva, generada por el Tehuano), lo que permite la formación de remolinos anticiclónicos más allá del Centro y del Oeste.

La termoclina después de haberse hundido varios metros asciende a los 40 m, lo que evidenció lo encontrado en Tehuanos I, y la termoclina en la zona Este del golfo no se eleva

hacia la superficie como debería esperarse en consideraciones de la divergencia del flujo horizontal de Ekman, como en el modelo de Crepon *et al.*, (1982). En vez de esto, en Tehuanos I la termoclina se encontró entre 5 y 10 m más profunda que antes del evento, por lo que la capa de mezcla superficial alcanzó un grosor de 25 m (Trasviña y Barton, 1997) y en Tehuanos II, la termoclina se encontró a los 50 m de profundidad. En ambos cruceros, la termoclina al no florecer totalmente en la superficie sugiere que, si bien existió una surgencia debida a las fuertes rachas de viento, ésta no llegó a florecer en su totalidad hacia capas de agua más superficiales, aunque sí contribuyó a la compresión y elevación de la termoclina hacia una profundidad menor sobre la que generalmente se encuentra (50 m). Esto dio como resultado que el enfriamiento moderado sobre ésta zona (mayor en Tehuanos I que Tehuanos II), se debiera a la mezcla turbulenta entre la capa de agua subsuperficial y el agua superficial del Golfo generada por el Tehuano, aunque en Tehuanos II solo se alcanzara a mezclar hasta la termoclina superior de 20 m, aun así ambos procesos contribuyeron al enfriamiento superficial del Golfo (Trasviña y Barton, 1997).

En Tehuanos II, a diferencia de Tehuanos I, se presentó una mayor relajación por vientos débiles en dirección Este del Golfo (Barton *et al.*, 2009), que permitió que la capa de mezcla superficial de aguas cálidas tuviera un mayor alcance en la vertical, con un grosor de 40 m de profundidad. Esto dio menos contrastes entre las características termohalinas de la capa superficial y subsuperficial, a diferencia de lo sucedido sobre la zona Centro y Oeste, donde tuvo mayor efecto el Tehuano. Caso contrario en Tehuanos I, donde a pesar de que el contraste de temperatura entre estas dos capas de agua es igualmente menor, parece ser que

la termoclina en la zona Este se ubicó sobre el gradiente vertical de temperatura más intenso del cruce, unos 8°C/m (Trasviña y Barton, 1997).

## **9.2 Salinidad**

### **9.2.1 Análisis en la Horizontal**

La variación de la salinidad dependió del aporte de agua. Las bajas concentraciones en la zona Este del GT, hacen referencia principalmente al arrastre de las aguas provenientes de la costa de Chiapas, la cual se encuentra influenciada por los ríos (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998), y la cuenca del Pacífico de Guatemala colindante con la frontera de México, donde las precipitaciones anuales ascienden a 4,000 - 5,500 mm (Barton *et al.*, 2009). El resultado del flujo cálido costero, conllevó la baja salinidad de agua superficial encontrada en cualquier lugar del golfo, presentando las características típicas de temperatura-salinidad de la CCCR (Barton *et al.*, 2009), atribuyendo la extensión del flujo a la relajación del evento.

Las concentraciones altas en la zona Oeste, difirieron de la salinidad ambiente de la zona Este ( $S < 33.3$ ) y Oeste ( $S < 33.7$ ) (Reyes-Hernández y Murad, 2005). Debido al enriquecimiento de sales provenientes de una surgencia complementada con la mezcla turbulenta que se tuvo por parte del Tehuano, y que aparentemente interrumpió el chorro costero de la CCCR (Reyes-Hernández y Murad, 2005).

Las discrepancias en los valores de temperatura y salinidad entre Barton *et al.*, (2009) y este trabajo, se da en que ellos mencionan como el mínimo de salinidad 33.7 en ambos cruceros (Tehuanos I y Tehuanos II) y el máximo de 34.3, siendo la salinidad más alta durante Tehuano I (34.4). En este trabajo se encontró lo contrario, salinidades más altas en Tehuanos II

que en Tehuanos I (Tab.VIII.1.1b). Se concuerda con la descripción de la distribución, donde la lengüeta de baja salinidad (<34.1) sobre la plataforma continental del Este del GT, penetró más allá del Oeste cruzando la cabeza del GT en Tehuanos II que en Tehuano I (Barton *et al.*, 2009). Consideramos que las diferencias numéricas entre Barton *et al.*, (2009) y el presente trabajo, son atribuidas a las bases de datos consultadas. Por otra parte, la incursión cerca de la cabeza en la parte occidental del GT, con aguas frías (12° - 18°C) y salinas (<34), acarreadas a la superficie por efecto de la surgencia y mencionada por algunos autores (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998), no se hacen presentes en este estudio.

### 9.2.2 Analisis en la Horizontal; comparación con otras campañas oceanográficas.

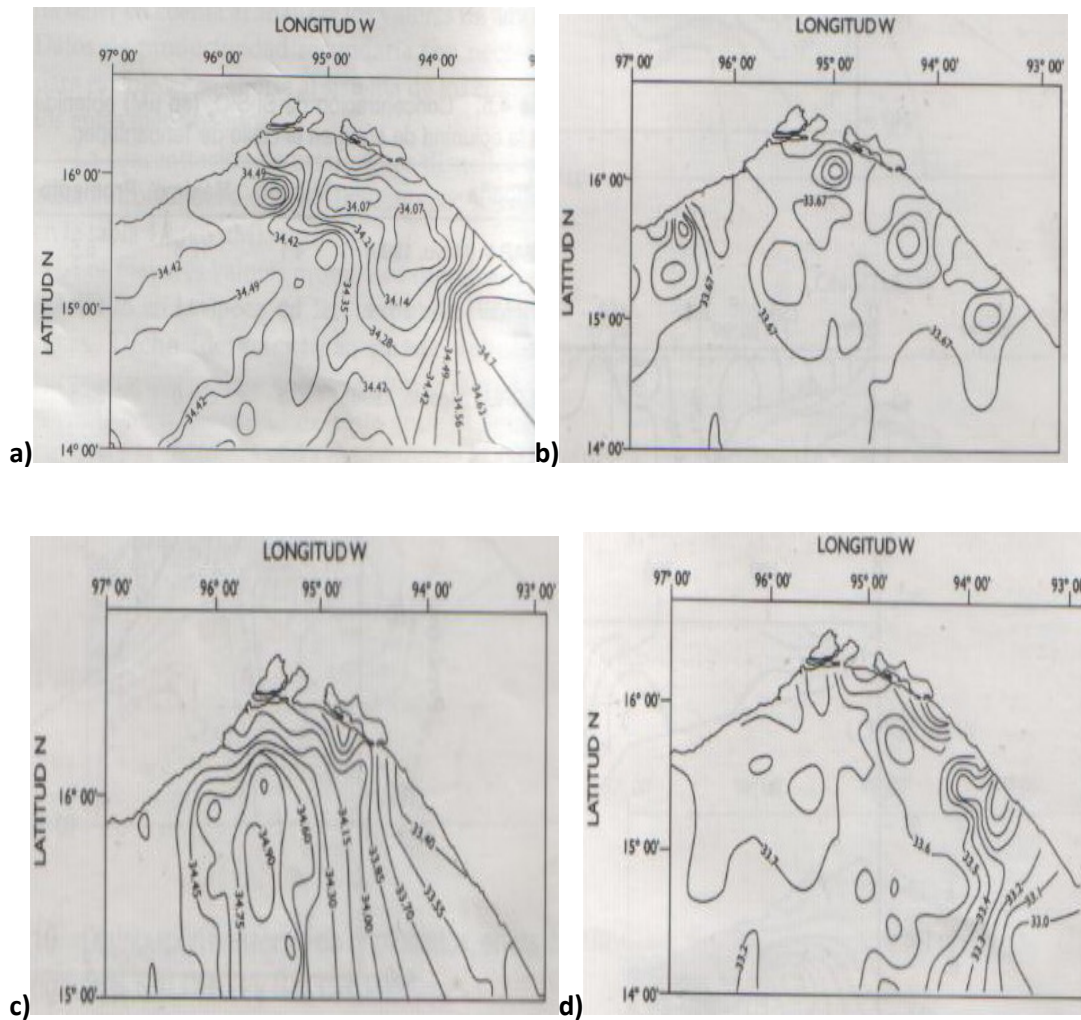
La salinidad comparada con otras campañas oceanográficas realizadas durante invierno (Tab.IX.2.1), muestra que el promedio superficial del GT durante Tehuanos II, es semejante a los reportados en SALCRU II y FIQUIMBI II.

**Tabla.IX.2.1** Valores de salinidad superficial en las campañas oceanográficas realizadas entre Mayo de 1989 - Julio de 1992 (Vázquez Gutiérrez *et al.*, 1998).

| Campaña Oceanográfica       | Mínimo | Máximo | Promedio |
|-----------------------------|--------|--------|----------|
| MIMAR V (Mayo,1989)         | 34.724 | 34.998 | 34.827   |
| FIQUIMBI I (Noviembre,1989) | 32.446 | 34.832 | 33.423   |
| SALCRU I (Agosto,1990)      | 33.021 | 33.927 | 33.105   |
| SALCRU II (Noviembre,1990)  | 33.973 | 34.979 | 34.726   |
| FIQUIMBI II (Julio,1992)    | 33.265 | 34.988 | 34.541   |

Las salinidades en las campañas Tehuanos II y en SALCRU II, son semejantes los valores altos encontrados durante la época de secas, con máximos superficiales de 34.998, encontrados principalmente en la zona Oeste durante mayo (MIMAR V) (Tab.IX.2.1). Sin embargo, mientras que las altas salinidades de las campañas de Noviembre, Febrero y Julio son debidas a la mezcla moderada entre las masas superficiales de agua, las salinidades altas en el mes de Mayo son principalmente por exceso de evaporación del agua. Por otra parte, la relación de distribución de la salinidad con respecto a las campañas en temporada de reforzamiento de los Tehuanos, mostró una similitud con FIQUIMBI II, ya que la campaña SALCRU II mostró aún isopletras de <33 al Centro y Oeste del Golfo, mientras que FUIQUIMBI I las salinidades >34 abarcó la mayoría de la superficie del Golfo, aunque su promedio de salinidad fue <33 (Figs.9.2.1).

En la relación de distribución entre Tehuanos II y FIQUIMBI II, se observa que ambas campañas se encontraron valores más bajos de salinidad en la zona costera del Este del GT, y los máximos valores de salinidad se encontraron principalmente en la zona Oeste del Golfo (Fig.8.2.1; Fig.9.2.1c)



**Figura.9.2.1.** Variación superficial de la salinidad en las campañas oceanográficas **a)** FIQUIMBI I; **b)** SALCRU II; **c)** FIQUIMBI II y **d)** SALCRU I.

La salinidad en SALCRU I que corresponde al mes de Agosto, se encontró un mayor plegamiento de las salinidades, <33 hacia el Este, como si hubiese dado paso a un leve aumento en la zona Oeste del Golfo, posiblemente por un ligero incremento de viento asociado a los vientos del mes de Julio (Figs.9.2.1d).

### 9.3 Diagrama T-S; análisis de las masas de agua

Cuatro de los cinco tipos principales masas de agua presentes en los océanos (*agua superficial, agua sub-superficial, agua intermedia, agua profunda y agua de fondo*) (Cifuentes Lemus *et al.*, 2003), e identificadas durante Tehuanos II, han sido descritos desde 1967 (Wyrski) como las masas de agua del Pacífico Ecuatorial Este y modificados en algunos aspectos por otros autores como Trasviña *et al.*, (2003).

El diagrama T-S resultante en Tehuanos II, fue congruente con el obtenido a partir de datos de la National Oceanographic Data Center (NODC) para el GT (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).

La masa de ***agua superficial*** debido a que su volumen está constantemente influida por los procesos externos (Fig.8.3.1), las corrientes y principalmente por la temperatura, que al modificarse produce cambios en la densidad y por consiguiente en la salinidad (Cifuentes-Lemus *et al.*, 2003). Fue modificada en gran parte del GT, por lo que sus características se hicieron presentes durante los eventos fuertes de viento (meses de invierno), difiriendo de sus valores reales reportados con temperatura  $>25^{\circ}\text{C}$  y salinidades  $<34$  (Reyes-Hernández y Murad, 2005).

Las temperaturas y salinidades propias de la masa de agua superficial, solo se hicieron presentes en la zona Este del GT, que debido a la relajación de los vientos permitió la entrada de las aguas cálidas y de baja salinidad propias de la ATS, introducida por la CCR (Trasviña y Barton, 1997; Barton *et al.*, 2009; Monreal-Gómez y Salas de León, 1998). La baja salinidad de

esta masa de agua se debe al exceso de precipitación sobre la evaporación que existe en el área de su formación (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).

La masa de agua **sub-superficial** o en algunos casos considerada como *agua superior*, debe su origen al hundimiento del agua superficial localizadas a menor latitud, en movimientos llamados convergencia (Cifuentes-Lemus *et al.*, 2003). Esta masa de agua se localizó a los 50 m de profundidad en Tehuanos II, se encuentra por lo regular en ausencia de factores que modifiquen su distribución, entre los 150 y 700 m de profundidad, separada de la anterior masa de agua por una zona bien delimitada: la “termoclina” (Cifuentes-Lemus *et al.*, 2003).

Los valores obtenidos para la masa de agua sub-superficial, concordaron con los reportados en literatura, correspondientes a la masa de ASTS cuyos valores de salinidad llegan hasta los 35 y 36, con temperaturas de 15° - 28°C, pero generalmente es identificada como agua cálida (Wyrski, 1967; Monreal-Gómez y Salas de León, 1998). Reyes-Hernández y Murad, (2005) mencionan la presencia de ATS y ASTS, con temperaturas aproximadas a los 14°C. La ASTS fue igualmente transportada por la CCCR (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).

El **agua intermedia** encontrada a partir de los 500 a 1,500 m de profundidad, concuerda con lo reportado en literatura para la masa de AIA, cuya temperatura es aproximadamente 5°C y salinidad de 34.5 (Trasviña y Barton, 1997; Reyes-Hernández y Murad, 2005). McLellan (1968) hace referencia de AIA, como Agua Intermedia del Pacífico (**AIP**) ya que está presente en la mayoría del agua del Pacífico Tropical Oriental (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998). Esta masa de agua también fue resultado del hundimiento por convergencia de aguas superficiales que se ubicaron a mayor latitud o de la que se formó como agua profunda en una cuenca y salió fuera de ella, por lo que a menudo es ubicada entre los 700 y los 1,500 m

de profundidad, que se extiende hasta los 10°N en el Índico y el Pacífico (Cifuentes-Lemus *et al.*, 2003).

El ***agua profunda*** encontrada en Tehuanos II entre los 1,500 y 2,500 m de profundidad, concuerda con su ubicación general entre los 1,500 y 3,000 m de profundidad que proviene de las altas latitudes por hundimientos de las masas que se localizan a menos profundidad (Cifuentes-Lemus *et al.*, 2003). El promedio entre los estratos 1,500 y 2,500 m es: salinidad de 34.67 y temperatura 2.05°C de Tehuanos II (Tab.VIII.1.1), concuerda con McLellan (1968) para la masa de agua de ACP, la cual generalmente es ubicada a partir de los 2,000 m hasta el fondo, con salinidades de 34.6 a 34.7 y temperaturas entre 1 y 2°C (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998). Esta masa de agua suele ser más estable y está presente en todos los océanos, solamente presenta modificaciones en sus características, al mezclarse con aguas intermedias en las altas latitudes del Atlántico Norte (Cifuentes-Lemus *et al.*, 2003).

## 9.4 Oxígeno

### 9.4.1 Análisis en la Horizontal; comparación con otras campañas oceanográficas.

Los valores de oxígeno dentro de la columna de agua eutrófica (0 - 100 m) en Tehuanos II, fueron mayores a los de otras campañas oceanográficas (Tab.VIII.4.6; Tab.IX.4.1).

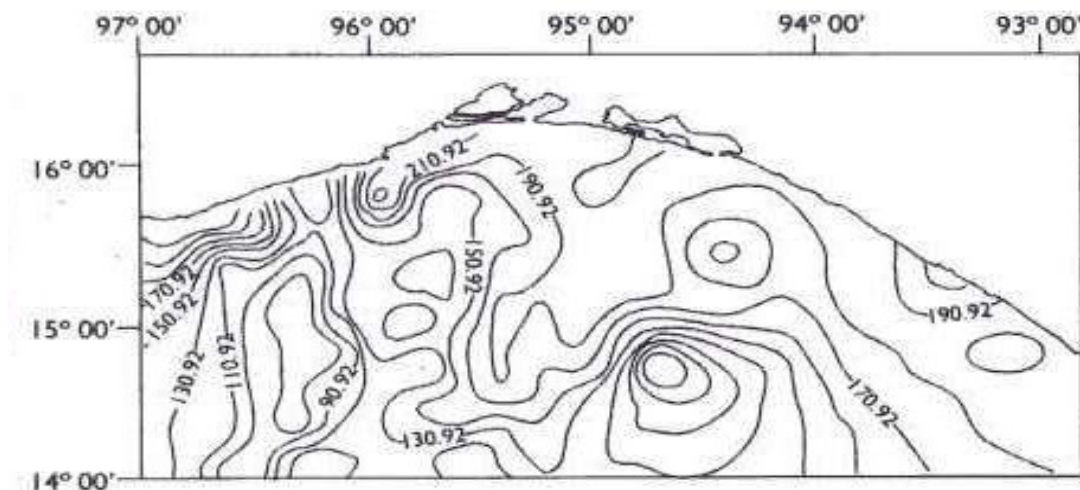
La sobresaturación de oxígeno al Sureste del GT, entre los 14°N, 94°W a 175 Km fuera de la costa, se atribuye a la mezcla entre las capas superficiales enriquecidas por aguas más profundas debidas a la surgencia, anudada a la presencia de un parche fitoplanctónico que aportó oxígeno de manera significativa por fotosíntesis. Esto concordó con lo encontrado por Nájera-Martínez *et al.*, (1997) donde las abundancias de los dinoflagelados aunque fueron tres

órdenes menor a las diatomeas que conformaron el fitoplancton total localizados en la zona centro del Golfo, midieron relativamente altos valores de células dinoflagelados en las estaciones localizadas en la zona central-este del GT y alejadas de la costa, concordando con la ubicación de la marea roja presente durante Tehuanos II.

**Tabla.IX.4.1** Valores de  $O_2$  ( $\mu M$ ) en las campañas oceanográficas realizadas entre Mayo de 1989 - Julio de 1992 en el GT (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

| <b>Campaña Oceanográfica</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> | <b>Promedio</b> |
|------------------------------|---------------|---------------|-----------------|
| MIMAR V (Mayo,1989)          | 9.8           | 233.1         | 123.5           |
| FIQUIMBI I (Noviembre,1989)  | 7.7           | 235.8         | 99.4            |
| SALCRU I (Agosto,1990)       | 4.0           | 245.3         | 103.3           |
| SALCRU II (Noviembre,1990)   | 9.9           | 253.6         | 105.5           |
| FIQUIMBI II (Julio,1992)     | 5.9           | 232.0         | 134.9           |

La sobresaturación de oxígeno al Sureste del GT en Tehuanos II, difiere de lo encontrado durante la campaña FIQUIMBI I, donde no se hizo presente otro factor externo que no fuese el Tehuano, que aumentara las concentraciones de oxígeno ya provocadas por los vientos, por lo que las concentraciones más altas sin llegar a los niveles de saturación se localizaron en la zona costera del Golfo, marcadas por una isopleta de 211  $\mu M$ , entre los 96°W, 16°N, y descendió su concentración conforme se alejaba de ella hasta 90.2  $\mu M$  (Fig.9.4.1).



**Figura.9.4.1.** Variación del oxígeno ( $\mu\text{M}$ ) a 5 m de profundidad, en la campaña oceanográfica FIQUIMBI I (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

Las concentraciones altas de oxígeno encontradas en Tehuanos II, se asemejan a los reportados en MIMAR V realizada en mayo, mes que abarca la temporada de primavera, donde se mantuvo un promedio alto de concentración por un incremento en fotosíntesis (Vázquez Gutiérrez *et al.*, 1998). En comparación con otras campañas y aunque es relativa la comparación de oxígeno respecto a la concentración, ya que pueden haber factores externos que modifiquen su cantidad como en Tehuanos II (presencia de fitoplancton). Se puede inferir una comparación con relación a otras campañas durante la época de reforzamiento de Tehuanos, por el incremento de concentración de oxígeno debidas al evento de viento, donde se encontró afinidad de intervalo de resultados con SALCRU II y FIQUIMBI II, que es la temporada de lluvias y donde también se registraron concentraciones altas en promedio (Tab.IX.4.1).

#### **9.4.2 Análisis por horario.**

El análisis de oxígeno por horario durante la madrugada (00:00-06:00 h), presentó un caso especial de producción de oxígeno mayor al consumo, ya que en teoría durante esas horas, en ausencia de luz solar se debería de haber llevado a cabo un consumo de oxígeno, sin existir la posibilidad de que se genere una producción del mismo. Podría deberse a que durante los días 26 y 27 de Febrero, correspondientes a la mayoría de las estaciones que dieron el promedio de producción, se dio una reintensificación de viento, que aunque no fueron tan intensos como el primero, sí pudieron influir para que se aumentara la concentración de oxígeno, anudados al fototactismo (migración vertical) que pudieran tener algunas especies que conformaron el parche fitoplanctónico. Esto es también fundamentado con el hecho de haberse encontrado una profundidad del máximo de clorofila presente entre los 5 y 10 m de profundidad en las estaciones situadas en la zona Centro del Golfo, hasta cerca de 20 m de profundidad en la parte Centro-Este del Golfo. Estos máximos de clorofila fueron asociados fuertemente a los máximos de PP (Nájera-Martínez y Gaxiola-Castro, 2000). Aunque el muestreo de clorofila fue medido al medio día durante la campaña, da una referencia de la abundancia y alcance del fitoplancton en la vertical.

El oxígeno durante el día (06:00 - 12:00 h), la producción sobre el consumo de oxígeno de las estaciones ubicadas en la zona oceánica del Golfo contra las muestreadas en la parte costera, sugiere que durante esas horas la luz solar fue apenas la suficiente para que el organismo fotosintético la fijara y realizara sus procesos metabólicos. Es decir que, en la zona costera se presentó una profundidad de compensación somera o pronta, en la cual la respiración usada para la energía por los organismos igualaron la habilidad del mecanismo de

fotosíntesis para producir energía, mientras que mar adentro ésta profundidad de compensación tuvo variaciones, debida al enriquecimiento de un agua rica en oxígeno removidas por el efecto de viento anudada a la presencia de fitoplancton. Esto concordó con la mayor abundancia del fitoplancton localizadas en la parte central del Golfo, las cuales estuvieron fuertemente influenciadas por la mezcla vertical originada por el viento Tehuano, y la menor abundancia de fitoplancton total determinadas en las estaciones cerca de la costa hacia los extremos Oeste y Este del Golfo fuera de la influencia de la zona mezclada por el viento (Nájera-Martínez *et al.*, 1997).

Las estaciones muestreadas en la tarde (12:00 - 17:00 h) caso contrario al de medio día, el promedio de valor de producción menor al valor promedio de consumo, indicó que durante esas horas se aumentó la acción de respiración, que hizo que disminuyera la concentración de oxígeno.

En la noche (17:00 - 00:00 h), aunque el número de estaciones muestreadas fue menos a las otras horas del día, corrobora el fototactismo o migración vertical que pudieran haber tenido algunos organismos del fitoplancton y de la reintensificación de viento que se presentó a mitad del muestreo durante la campaña, con una producción de oxígeno mayor al consumo del mismo, en las estaciones localizadas principalmente en la zona oceánica del Golfo.

#### **9.4.3 Análisis en la Vertical; relación Oxígeno - Temperatura.**

La temperatura y salinidad tienen relación con el oxígeno al determinar su solubilidad, por lo que se espera que las concentraciones de O<sub>2</sub> en aguas superficiales estén cercanas a los

valores de saturación esperados en función de la temperatura y salinidad de las aguas (Millero, 2006).

En la distribución vertical del oxígeno, la relación oxígeno-temperatura se aduce a que la característica del perfil de  $O_2$ , más notable en la mayoría de los océanos, comprende concentraciones bajas en las capas superficiales y relativamente un incremento en aguas profundas. El mínimo en las capas superficiales es el resultado de un balance entre la oxidación biológica de la materia orgánica y la advección de aguas ricas en  $O_2$  (Millero, 2006). En algunas de las aguas del Pacífico y como sucede en el GT, el balance de concentración de oxígeno en las capas superficiales se inestabiliza por un incremento de inyección de oxígeno debida por eventos locales, que aumentan la actividad fotosintética de la zona, así como permiten una mayor entrada o advección de aguas ricas en  $O_2$ , que hacen característica su distribución vertical, tuvieron un comportamiento similar al perfil de temperatura, con máximos superficiales y decreciendo conforme la profundidad (Fig.8.4.5).

#### **9.4.4 Análisis en la Vertical; por zona y por transecto**

La distribución vertical del Oxígeno en el GT, tuvo comportamiento típico de las aguas del Pacífico Oriental Tropical, con máximos en la superficie y descendió de forma abrupta con respecto a la profundidad, hasta encontrar una zona de incremento de concentración. En comparación con las aguas polares, las cuales disminuyen ostensiblemente menos con la profundidad (de la Lanza-Espino, 2001; Fernández-Álamo y Färber-Lorda, 2006).

### **Transecto Oeste**

La deformación y hundimiento que tuvieron las isopletras de 60 y 80  $\mu\text{M/Kg}$  en la zona oceánica del Golfo, es asociado al reactor de motor de atrapamiento de agua provocadas por el avance del remolino anticiclónico.

La pendiente del descenso abrupto de concentración de oxígeno, da una idea de la transición de aguas menos someras a someras de la distribución típica horizontal y vertical que tendría el oxígeno en ausencia de factores externos como los Tehuanos, o un parche fitoplanctónico.

La primera parte de la distribución estaría determinada en la zona costera del golfo, con consumo inicial desde la superficie, que hizo que la profundidad de compensación fuera de 0 - 30 m aproximadamente, lo que indicó que la Producción Neta Total fue igual a cero, con la igualdad de respiración y producción fotosintética.

La segunda parte de la distribución se localizaría en la zona oceánica del Golfo, conformado por una compensación fotosintética más profunda, marcadas por las isopletras del inicio de la zona de mínimo oxígeno que se hicieron más extensas hacia la vertical. En otras palabras, la profundidad de compensación se hizo más profunda en aguas de mar abierto, donde la pycnoclina fue somera y menos profunda en la zona costera, donde gran cantidad de material particulado se encontró presente en el agua, afectó la absorción y reflexión de la luz, por tal motivo la profundidad de compensación también es conocido como compensación de intensidad o fotosintética (Nybbaken, 2001).

La concavidad que se formó teniendo la máxima concentración de oxígeno del transecto, muestra la relación oxígeno-temperatura, ya que la pendiente hacia abajo que formo la isopleta, concordó con el descenso de la isoterma de 18°C debido al entrampamiento de agua, las cual se extendió hasta los 100 Km de distancia de la costa.

### **Transecto Centro**

La pendiente del transecto Centro, las isopletras de oxígeno al igual que las isopletras de la temperatura, no mostraron muchas deformaciones en la vertical, ya que se encontraron condicionadas por la acción del viento, al estar justo por debajo de los vectores de máxima velocidad. Hicieron que no se mostrara la zona de transición entre las aguas del Golfo, lo que indica que las capas superficiales de agua ya no suelen ser muy someras por la turbulencia generada por el viento, así que ahora la presencia de la surgencia ayuda a la compresión de las isopletras.

### **Transecto Este**

En el transecto de la zona Este, la distribución superficial de oxígeno y temperatura, permiten entender la formación de la primer concavidad, la cual se localizó dentro del área donde se estuvo dando el entrampamiento de agua cálida y aunque no fue el mismo transecto marcado en el análisis de temperatura, el hundimiento de las isotermas más frías concordaron con el declive de las isopletras de oxígeno. Apoyan la hipótesis de que en dicho lugar la remoción de las corrientes provenientes del Este permitió que la advección de aguas cálidas fuera más profunda, dando indicios de la formación de un giro anticiclónico de gran diámetro, que hundió la capa mínima de oxígeno.

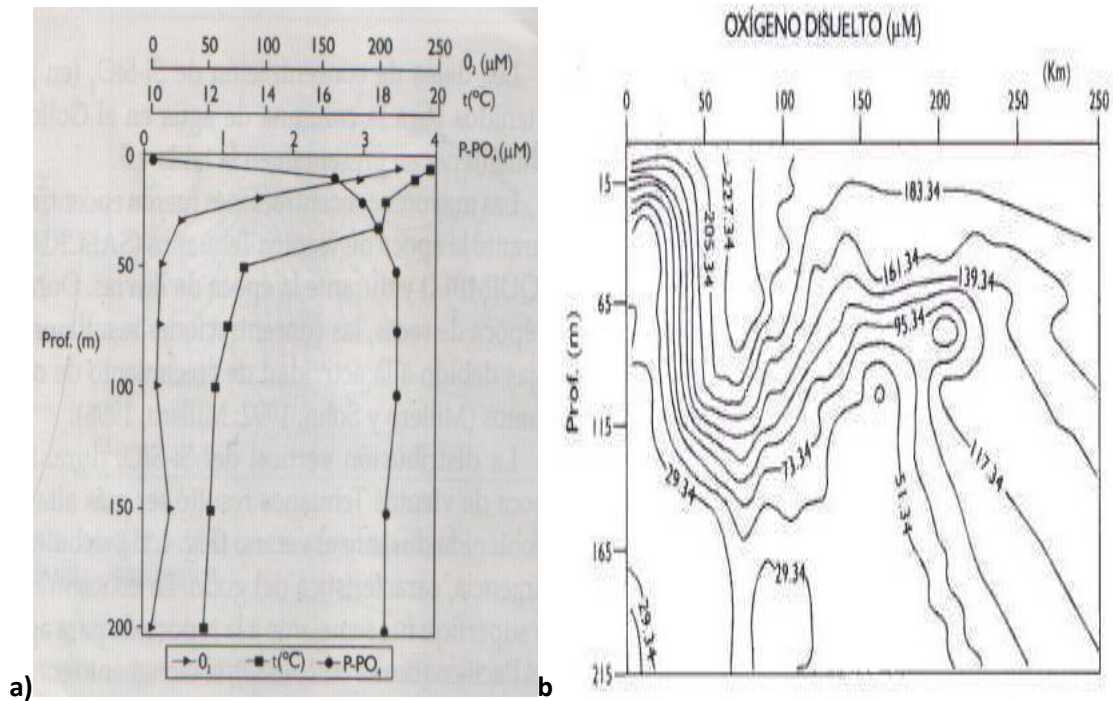
El hundimiento de las isotermas de mínimo oxígeno por el avance del remolino anticiclónico en el Oeste, también verifica la formación de un remolino anticiclónico pero ahora en la costa de la zona Este del Golfo.

La segunda concavidad más profunda y extensa está asociada a las isotermas superficiales de 25° y 23°C, que corresponden dentro de la franja de agua fría, y al área del parche de marea roja y por lo cual, encerró la máxima concentración superficial de oxígeno.

La distribución de oxígeno concuerda con lo reportado por Vázquez-Gutiérrez *et al.*, (1998), donde “el desplazamiento de las concentraciones altas de oxígeno en la parte Este y Oeste, son característica de la surgencia que sucede durante la presencia de los vientos Tehuanos y una sección vertical de distribución de oxígeno. Demostró que las aguas pobres de oxígeno se dieron en la costa, lo que permite establecer que la presencia de la surgencia en el GT es común y los Tehuanos permiten identificarlas con más claridad”.

#### **9.4.5 Análisis en la Vertical; comparación con otras campañas oceanográficas.**

El descenso de oxígeno en la vertical en Tehuanos II, coincide con la disminución promedio más pronunciada a partir de los 80  $\mu\text{M}$  en FIQUIMBI I. En Tehuanos II la oxiclina promedio del GT se ubicó a los 50 m de profundidad, coincidió con la termoclina promedio del GT y ambas son someras. En FIQUIMBI I, el descenso de oxígeno se encontró entre los 20 - 25 m de profundidad (Fig.9.4.2a). La zona de mínimo oxígeno ha sido definida entre los 10 y 100 m de profundidad dependiendo de la época (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).



**Figura.9.4.2. a)** Distribución vertical de oxígeno y **b)** Variación vertical de oxígeno, en la campaña oceanográfica FIQUIMBI I.

La variación vertical en FIQUIMBI I (Fig.9.4.2b), mostró hundimiento a poco menos de 50 Km de la costa, igual que en Tehuanos II (40 Km). Las isopletras marcadas por 95.34  $\mu M$  en FIQUIMBI I, se hundieron a los 140 m de profundidad aproximadamente, suben a partir de los 75 Km de distancia a los 115 m de profundidad a una distancia de 100 Km de la costa. En Tehuanos II, a 100 Km de la costa el ascenso de la isoterma de 80  $\mu M/Kg$  llegó a los 90 m de profundidad, aduciendo mayor penetración del vuelco de agua entrampada por el remolino anticiclónico en el Oeste, por parte del evento de viento en FIQUIMBI I.

## 9.5 NID ( $\text{NO}_2^-$ y $\text{NO}_3^-$ )

### 9.5.1 Análisis general de la distribución espacial de NID

La síntesis de datos oceanográficos incluyó la distribución de nutrientes disueltos del mar. La mayoría de los nutrientes inorgánicos que necesita el fitoplancton para su crecimiento, son componentes nitrogenados ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ), y el fósforo como fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) (Nybbaken, 2001). El análisis en Tehuanos II incluyó la distribución de los  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  las formas particuladas en las que se encuentra el nitrógeno en el mar gracias a la acción bacteriana y que son esenciales para el desarrollo del fitoplancton que es la base de la cadena trófica marina.

El ciclo del nitrógeno es complejo en el mar, debido a que responde con facilidad a una multitud de reacciones químicas (De la Lanza Espino, 2001), por lo que se esperaría que en presencia de una surgencia más superficial, las concentraciones de los iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  hubiesen presentado concentraciones altas en la capa de mezcla de 0 – 10 m de profundidad, por un ascenso de la termoclina. Pero como se observó en el análisis de temperatura, no fue así, quedando las concentraciones máximas de  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  en las termoclinas de 20 y 50 m de profundidad, respectivamente, y se encontraron valores mínimos en la superficie.

El  $\text{NO}_3^-$  al ser el micronutriente con mayor concentración en aguas oceánicas, es generalmente usado como indicador de zonas ricas en nutrientes (Nybbaken, 2001). Las máximas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  al quedarse a una profundidad de 50 m, se ubicó dentro de la zona que está definida como la termoclina permanente en la capa somera del Golfo y donde desde el punto de vista de la distribución de los nutrientes, dentro de la columna de agua de la región oceánica es el equivalente de la fase sedimentaria en la región costera (lagunas,

estuarios, marismas, bahías), en donde básicamente se circunscribe el ciclo biogeoquímico (De la Lanza Espino, 2001).

La termoclina recibe el material orgánico en diferentes estados de descomposición y terminan remineralizándose en sus compuestos inorgánicos. Cuando la termoclina es permanente y no se rompe, los compuestos orgánicos que quedan atrapados en ella continúan descomponiéndose para disponer de nutrientes, situación que llega a favorecer el empobrecimiento de las aguas superficiales la mayor parte del año (De la Lanza Espino, 2001). Cuando se presentan eventos que llegan a romper la termoclina, como es el caso de los Tehuanos, entonces el enriquecimiento de nutrientes que se le dio a la termoclina por parte de aguas más profundas que ascendieron por la surgencia, volvieron a redistribuir en la columna de agua de los compuestos orgánicos.

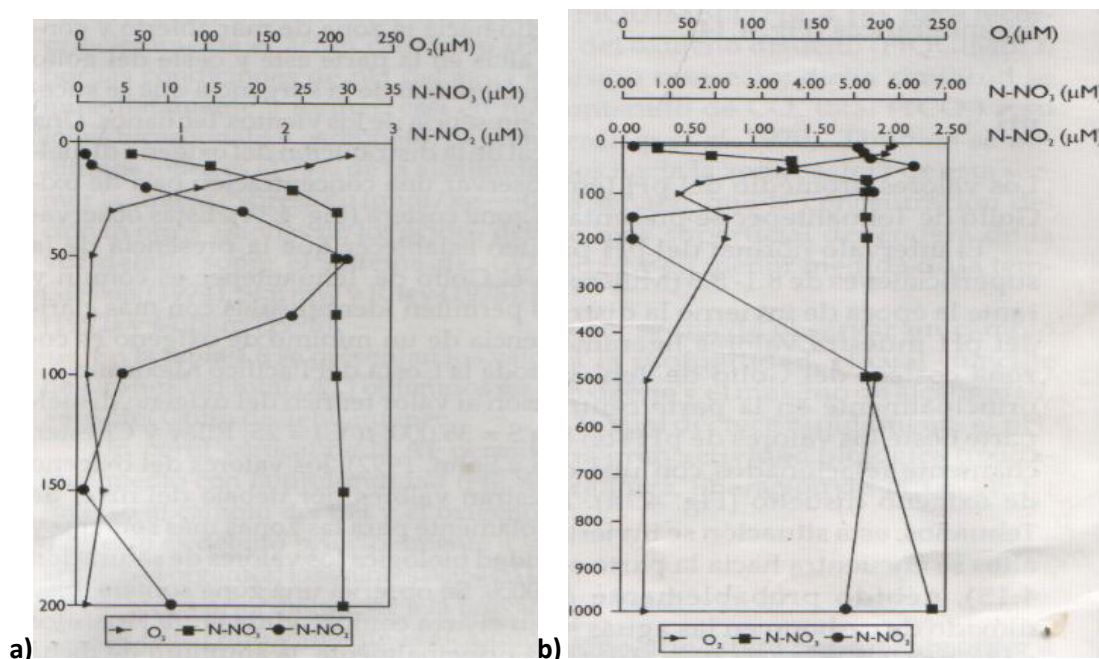
Los nutrientes al ser distribuidos nuevamente dentro de la columna de agua, permitieron que el fitoplancton presente dentro de la zona eutrófica se alimentara, dando como resultado que se favoreciera la reducción de oxígeno, ya que el  $\text{NO}_3^-$  como es la forma química mas asimilable por el fitoplancton y cualquier vegetación acuática, al ser consumido, implicó que los organismos invirtieran energía para reducirlo en amonio para formar proteínas (De la Lanza Espino, 2001). Este gasto de energía se tradujo en un aumento de la respiración que redujo la cantidad de oxígeno presente en la capa de agua. Es por esta razón que tanto el  $\text{NO}_3^-$  como el  $\text{NO}_2^-$  estuvieron asociados al mínimo de oxígeno (Fig.8.5.2).

El máximo de  $\text{NO}_2^-$  a los 20 m profundidad, es asociado al inicio de descenso de oxígeno, además de encontrarse dentro de la capa de agua de la compensación fotosintética, por lo que la oxidación de  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NO}_3^-$ , no se completó.

El primer mínimo de concentración de  $\text{NO}_2^-$  en la superficie está asociado a su inestabilidad química, por ser un compuesto intermedio y porque las condiciones óxicas en la superficie se restablecen en menos de 48 hrs. (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998). Además se presentaron características de sobresaturación de oxígeno, mientras que el segundo mínimo a los 100 m de profundidad también está asociado al restablecimiento de la condición óxica, pero estas son debidas posiblemente al ascenso por parte de aguas ricas en oxígeno (Fig.8.5.2).

### **9.5.2 Análisis en la Vertical; comparación con otras campañas oceanográficas**

La concentración máxima de los  $\text{NO}_2^-$  a los 20 m de profundidad, difirió de la ubicación encontrada en las campañas FIQUIMBI I y FIQUIMBI II, donde se encontraron dos picos de incremento de concentración: el primero asociado al mínimo de oxígeno y a la compensación fotosintética, entre los 40 m de profundidad en ambas campañas, mientras que el segundo máximo lo atribuyen posiblemente a la reducción bacteriana del  $\text{NO}_3^-$ , ya que se ubicó a profundidades de 200 m en FIQUIMBI I (Figs.9.5.1a) y 500 m FIQUIMBI II (Fig.9.5.1b) (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998). En cualquier caso, el intervalo de 0.1 - 2.9  $\mu\text{M}$  de  $\text{NO}_2^-$  encontrado durante Tehuanos II, no difirió de lo reportado para otros ambientes acuáticos (<0.01 a 3.0  $\mu\text{M}$ ) (De la Lanza Espino, 2001), pero sí presentó concentraciones bajas con respecto a los reportados para el GT (0.07-4.45  $\mu\text{M}$ ), concentraciones que no son diferentes para otras áreas del Pacífico, y que no alcanzan las concentraciones altas reportadas en otras zonas donde se da una surgencia (Codispoti y Packard, 1980; Millero, 1996; Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).



**Figura.9.5.1.** Distribución vertical de  $NO_3^-$  y  $NO_2^-$  y  $O_2$ , en las campañas oceanográficas; **a)** FIQUIMBI I y **b)** FIQUIMBI II.

En Tehuanos II a pesar de la presencia de rachas de viento a mitad del crucero (26 - 27 de Febrero), pudo haber sido la causa de la ruptura de la termoclina que permitió se encontrara más superficial que durante Tehuanos I. No se observaron los máximos de  $NO_3^-$  cercanos a la superficie, quedaron en la profundidad de 50 m, como sucedió durante FIQUIMBI II, donde el primer máximo de  $NO_3^-$  se ubicó entre los 50 y 60 m de profundidad (Fig.9.5.1b). Mientras que en FIQUIMBI I el primer máximo de  $NO_3^-$  se encontró entre 25 - 30 m de profundidad (Fig.9.5.1a), ambos asociados con el inicio del descenso de oxígeno para después permanecer constante.

El intervalo (0.7-49  $\mu M$ ) y promedio (15.9  $\mu M$ ) de concentración de  $NO_3^-$  de Tehuanos II son semejantes al de SALCRU II (Tab.VIII.5.1). En FIQUIMBI I su promedio fue 11.1  $\mu M$  y el valor máximo de 71.4  $\mu M$  (Tab.IX.5.1), es mayor a SALCRU II y Tehuanos II, pero el promedio de

concentración es menor a la de ambas campañas, al igual que el mínimo de concentración encontrada.

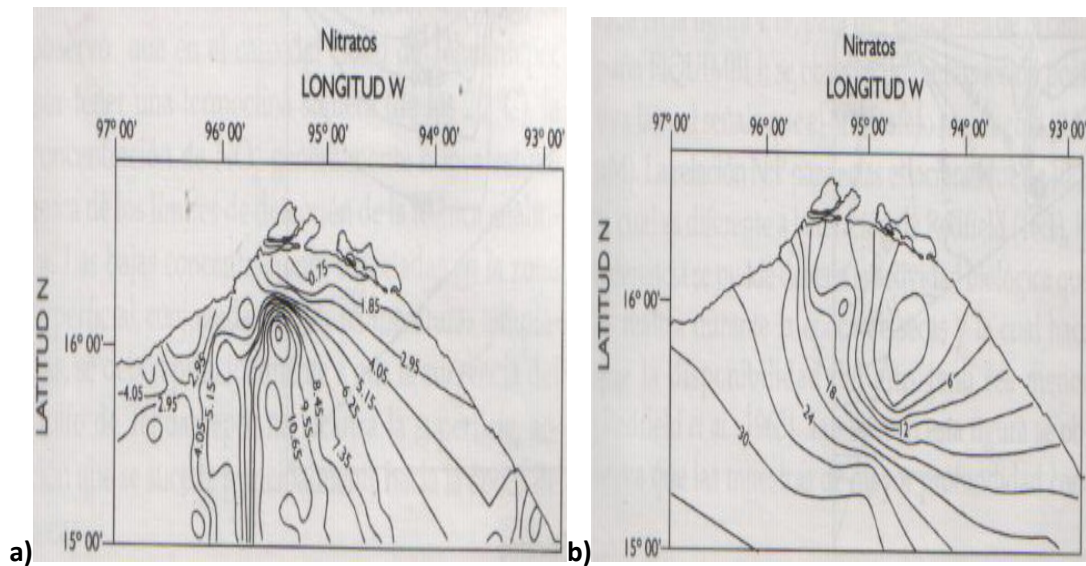
**Tabla.IX.5.1.** Valores de  $\text{NO}_3^-$  ( $\mu\text{M}$ ) en las campañas oceanográficas realizadas entre Mayo de 1989 - Julio de 1992 en el GT (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

| <b>Campaña Oceanográfica</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> | <b>Promedio</b> |
|------------------------------|---------------|---------------|-----------------|
| MIMAR V (Mayo,1989)          | 0.2           | 39.6          | 14.0            |
| FIQUIMBI I (Noviembre,1989)  | 0.2           | 71.4          | 11.1            |
| SALCRU I (Agosto,1990)       | 0.7           | 53.9          | 8.7             |
| SALCRU II (Noviembre,1990)   | 0.7           | 49.0          | 15.9            |
| FIQUIMBI II (Julio,1992)     | 0.7           | 15.1          | 4.2             |

En la temporada de reforzamiento de los Tehuanos, las altas concentraciones de nutrientes están siendo mayormente acarreadas hacia capas de agua menos profundas por corrientes de aguas ascendentes, en las zonas llamadas de surgencia o de afloramiento (Cifuentes Lemus *et al.*, 1997). Aunque en muchas ocasiones éstos no llegan a florecer del todo en la superficie, queda la mayoría de las concentraciones máximas de nutrientes atrapados en la termoclina general del Golfo, como ocurrió durante Tehuanos II, cuya función es la fase sedimentaria de la zona eutrófica del océano (De la Lanza Espino, 2001). Por tanto y como era de esperarse, los niveles de concentración de  $\text{NO}_3^-$  en la zona eutrófica, fueron mayores durante Tehuanos II al igual que FIQUIMBI I y SALCRU II, que durante la temporada de lluvias (FIQUIMBI II), en el mes de mayo (MIMAR V) y agosto (SALCRU I) (Tab.IX.5.1).

### 9.5.3 Análisis en la superficie; comparación con otras campañas oceanográficas

Los  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ , tuvieron la misma distribución superficial característica del GT durante la temporada de reforzamiento de los Tehuanos, también observada en FIQUIMBI I (Figs.8.5.3; Fig.9.5.2b). Las concentraciones más altas siguieron el origen y desplazamiento de la franja de agua fría (Suroeste), como se esperaba ante la presencia de una surgencia más superficial, a diferencia de la distribución en FIQUIMBI II (temporada de lluvias), donde las concentraciones más altas parecen indicar el aporte de  $\text{NO}_3^-$  desde la costa en la zona Centro y principalmente Este del Golfo (Fig.9.5.2b).



**Figura.9.5.2. a)** variabilidad superficial de  $\text{NO}_3^-$  en FIQUIMBI I con isopletas que muestran un mínimo de 0.75 y un máximo de 10.65; **b)**FIQUIMBI II, con isopletas de 6 y 30  $\mu\text{M}$

En Tehuanos II, a diferencia de FIQUIMBI I, las concentraciones más altas de  $\text{NO}_3^-$  se ubicaron desde la costa extendiéndose hacia la zona oceánica con las isopletas de 10  $\mu\text{M}$ , mientras que en FIQUIMBI I, las isopletas de 10.6  $\mu\text{M}$  se ubicaron solo en la parte oceánica del

Golfo (Fig.8.5.3a; Fig.9.5.2a). En FIQUIMBI I, la máxima concentración de  $\text{NO}_3^-$  tampoco se hace presente en la superficie.

Las concentraciones altas de  $\text{NO}_3^-$  a los 50 m de profundidad en la parte costera del GT, sugieren que por su ubicación se debieron mas a un aporte continental, provocado por el soplo de los vientos en dirección tierra-mar, que transportó gran cantidad de nutrientes, generalmente procedentes de la meteorización de las rocas y el suelo provenientes a través de las barreras desde las playas lagunares. La concentración alta de nitratos se ubicó dentro de la extensión de la barrera continental de dunas del Mar Tileme, ubicado entre los paralelos  $16^\circ 21'$  y  $16^\circ 31'N$  y los meridianos  $94^\circ 44'$  y  $95^\circ 3'W$ . El margen continental al recibir todos estos productos de intemperismo y desechos continentales, constituye una de las zonas más fértiles de los océanos, donde la productividad es alta, por lo que altas concentraciones de materia orgánica fueron sepultadas junto con los aportes continentales (Carranza Edwards *et al.*, 1998).

Las altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  a los 50 m de profundidad en la parte oceánica del GT, muestra lo que pudiera ser el entrampamiento de nutrientes en la termoclina por parte del ascenso de aguas ricas en ellos, anudado a la descomposición de materia orgánica por parte de las bacterias cuya actividad química liberó nutrientes en las capas superficiales (De la Lanza Espino, 2001), se hundieran quedando algunos atrapados en la termoclina y otros seguirían hacia aguas más profundas.

## 9.6 pH y AT

### 9.6.1 Análisis de pH y AT; comparación con otras campañas oceanográficas.

El promedio del pH registrado durante Tehuanos II, no difirió del intervalo de pH para el agua de mar de 7.5 - 8.4 (Nybbaken, 2001), aunque si mostró valores máximos >8.4. Sin embargo, el pH del agua de mar a diferencia del agua pura (el cual suele ser neutral por la disociación de la molécula de agua en el mismo número de iones  $H^+$  e  $OH^-$ ), suele tener una variabilidad altamente alcalina por la presencia de iones, como el calcio, potasio y sodio. El ingreso de la molécula del  $CO_2$  al sistema acuático, permite a través de las reacciones que tiene al conjugarse con la molécula del agua, que el sistema de carbonatos funcione como buffer (amortiguador), para mantener el agua del océano dentro de un intervalo estrecho de pH (Nybbaken, 2001).

En el GT durante la época de invierno que corresponde a los Tehuanos, el intervalo de pH reportado con respecto a las demás épocas del año, mostró un ligero descenso en sus valores (Tab.IX.6.1), caso que no se evidenció durante Tehuanos II (Tab.VIII.6.1). En este los valores fueron ligeramente más altos, incluso con respecto a los reportados en Mayo (MIMAR V), lo que sugiere que el sistema de carbonatos (ecuaciones 1-3), tuvo una mayor tendencia a desplazarse hacia la derecha, para compensar todos aquellos iones  $H^+$  libres que pudieron estar presentes durante el evento de viento. El sistema buffer se logró cuando las reacciones de los carbonatos equilibraron a los  $H^+$  en exceso, produciendo más iones bicarbonato y carbonato, que provocó que el pH aumentara (Nybbaken, 2001; <sup>2</sup>), confiriéndole al GT una alta concentración de AT, igual que los valores de pH mostrados durante Mayo y Agosto (Tab.IX.6.1).



**Tabla.IX.6.1.** Valores de pH y AT ( $\mu\text{M/Kg}$ ) en las campañas oceanográficas realizadas entre Mayo de 1989 - Julio de 1992 en el GT (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

| Campaña                        | pH     |        |          | Alcalinidad Total ( $\mu\text{M/Kg}$ ) |        |          |
|--------------------------------|--------|--------|----------|----------------------------------------|--------|----------|
|                                | Mínimo | Máximo | Promedio | Mínimo                                 | Máximo | Promedio |
| MIMAR V<br>(Mayo,1989)         | 7.335  | 8.410  | 7.986    | 2,311                                  | 2,509  | 2,404    |
| FIQUIMBI I<br>(Noviembre,1989) | 7.260  | 8.370  | 7.783    | 1,980                                  | 2,326  | 2,187    |
| SALCRU I<br>(Agosto,1990)      | 7.660  | 8.380  | 7.865    | 1,877                                  | 2,550  | 2,199    |
| SALCRU II<br>(Noviembre,1990)  | 7.260  | 8.230  | 7.642    | -----                                  | -----  | -----    |
| FIQUIMBI II<br>(Julio,1992)    | 6.971  | 8.35   | 7.881    | 1,981                                  | 2,338  | 2,161    |

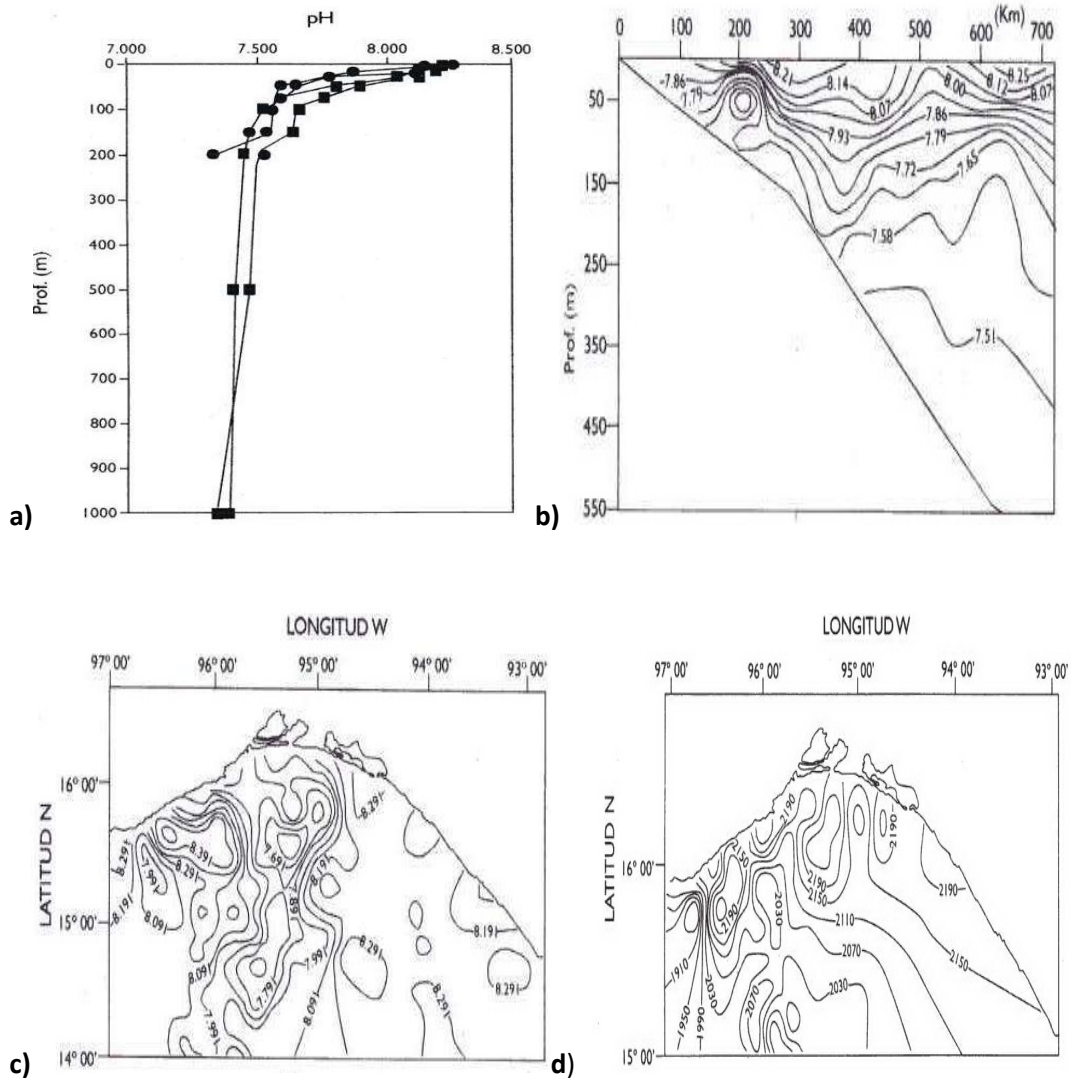
La AT durante Tehuanos II, aunque se encontró cerca del intervalo reportado por FIQUIMBI I (Noviembre), también guardó una relación de concentración con las reportadas durante FIQUIMBI II (Julio), sugiriendo que cuando hay una reintensificación de los Tehuanos (Julio, Noviembre-Febrero), las concentraciones de alcalinidad óptimas que se alcanzan son menores a las del resto del año. En FIQUIMBI I el pH necesario para mantener el equilibrio del sistema de carbonatos fue 7.26 - 8.37 con un promedio de 7.78, y alcanzar un intervalo óptimo de 1,980 - 2,226  $\mu\text{M/Kg}$  de AT (Tab.IX.9.6.1).

En Tehuanos II el pH necesario para mantener el equilibrio fue mayor (7.280 - 8.493), con un promedio de 8.085 para alcanzar un intervalo de concentración de AT de 1,946 - 2,324  $\mu\text{M/Kg}$  y un promedio de 2,205  $\mu\text{M/Kg}$  (Tab.VIII.6.1 y Fig.8.6.4b). Se parece más a los valores reportados en FIQUIMBI II, si se compara con referencia a una reintensificación de viento, ya

que como se había mencionado, los valores de pH alcanzados en Tehuanos II se encuentran más cercanos a los reportados en MIMAR V (Tab.IX.6.1).

La relación entre Tehuanos II y FIQUIMBI II se muestra con los valores mínimos de pH presentes sobre toda la capa superficial del GT ( $>8.0$ ), se extienden hacia capas de agua más profundas (Figs.9.6.1a y b). A diferencia de FIQUIMBI I, se registraron valores mínimos superficiales marcados por las isopletras de 7.69 y por consiguiente una AT menor al promedio de  $2,187 \mu\text{M/Kg}$ , ubicados dentro del desplazamiento de la franja de agua fría, mientras que los valores de pH  $>8$  y  $>2,187 \mu\text{M/Kg}$  de AT, se ubicaron hacia el Este y Oeste del Golfo con ligeros parches dentro del agua cálida que entrampó el remolino anticiclónico (Figs.9.6.2a y b). Esto sugiere que durante ésta campaña con la presencia de pH  $<7$ , la surgencia se hizo más superficial que la que pudo haberse presentado en Tehuanos II.

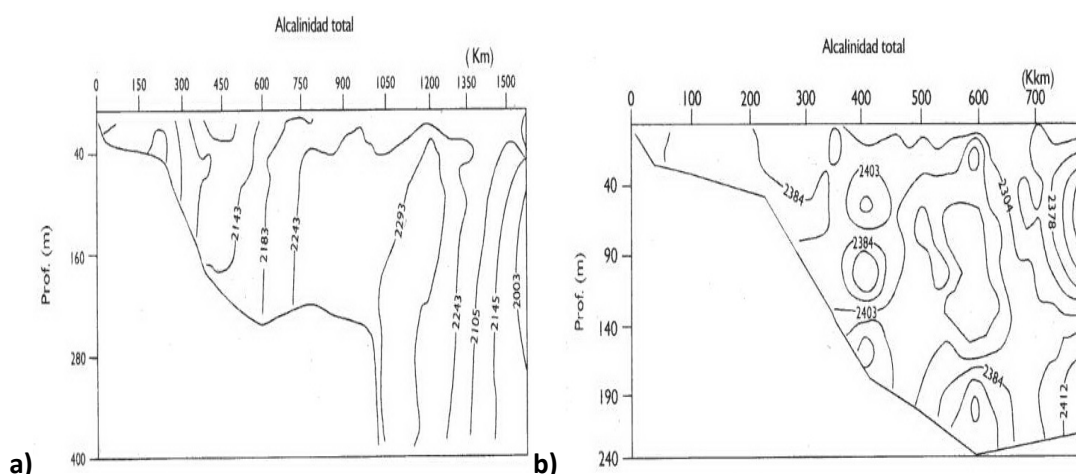
La surgencia presente en capas más superficiales, lo sugiere de igual forma Vázquez Gutiérrez *et al.*, (1998), al relacionar la disminución de pH con el incremento del  $\text{CO}_2$ , debidas a la ascensión de aguas más profundas.



**Figura.9.6.1. a y b)** Distribución y variación vertical de pH en la campaña FIQUIMBI II. **c)** Distribución de pH a 5m de profundidad. **d)** Distribución de AT a 10 m de profundidad. Ambas distribuciones en FIQUIMBI I (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

En Tehuanos II, aunque los niveles de pH para alcanzar el equilibrio de concentración de AT fueron mayores a las de otras campañas durante los meses de reintensificación de viento, el patrón de distribución en la vertical de AT fue el mismo, con las isopletas de

concentración presentes en la superficie que se extienden en la vertical de forma uniforme, variando solo su ubicación en la horizontal, como lo muestra FIQUIMBI I (Fig.9.6.2a). A diferencia de las isopleas mostradas en Mayo, las cuales variaron en la vertical sin mostrar uniformidad de extensión con respecto a las isopleas desde la superficie (Fig.9.6.2b).



**Figura.9.6.2.** Variación vertical de AT ( $\mu\text{M/Kg.}$ ) durante las campañas **a)** FIQUIMBI I y **b)** MIMAR V (Vázquez Gutiérrez *et al.*, 1998).

En Tehuanos II se observa que las isopleas mayores al promedio de  $2,206 \mu\text{M/Kg}$  (Fig.8.6.4a; Tab.VIII.6.1) y  $>2,187 \mu\text{M/Kg.}$  de FIQUIMBI I (Fig.9.6.2a) se localizaron al Centro del GT, por consiguiente las zonas Oeste y Este tuvieron las menores concentraciones de AT. En Tehuanos II la ubicación de las isopleas en la vertical que presentaron las concentraciones menores al promedio de AT, concordaron con las isopleas  $<2,200 \mu\text{M/Kg.}$  de la imagen superficial, que se ubicaron dentro de las aguas cálidas que fueron entrampadas por los remolinos anticiclónico (el que se sugiere que se estaba formando en la zona Este y el giro de gran diámetro que se desplazaba hacia el Oeste) (Fig.8.6.2)

### 9.6.2 Análisis en la Horizontal de pH y AT; relación con el oxígeno.

Las concentraciones de AT por encima del promedio superficial, su ubicación más orientada hacia el Este y levemente al Centro del Golfo, hace suponer que el cambio de pH depende más de procesos biológicos como la fotosíntesis que los cambios de temperatura debidas a procesos físicos, como surgencia, relacionándose de esta forma con la ubicación de las zonas mínimas y máximas de oxígeno.

Los valores altos de pH ( $>8.36$ ) y las concentraciones de AT ( $>2,227 \mu\text{M/Kg}$ ) sobre la superficie (Tab.VIII.6.2), coincidieron con las concentraciones altas de oxígeno ( $>217 \mu\text{M}$ ) en el Centro del GT, siguiendo la trayectoria de la franja de agua fría y al Este donde se ubicó el parche fitoplanctónico. La forma en la que se relacionaron estos tres parámetros, tiene que ver con la interacción del sistema de carbonatos con los procesos de fotosíntesis y respiración de la siguiente forma:

La fotosíntesis al consumir  $\text{CO}_2$ , desplaza el equilibrio de reacciones antes descritas hacia la derecha, causando que el pH aumente al bajar la concentración de  $\text{CO}_2$  libre, el cual ocasiona a su vez una disminución en la concentración del ión hidronio ( $\text{H}^+$ ). Por otro lado, los procesos de respiración aerobia y anaerobia generan  $\text{CO}_2$ , el cual dependiendo de su concentración puede desplazar el equilibrio descrito en la ecuación 1 hacia la izquierda, causando que el pH disminuya (Millero, 2006; <sup>5</sup>). Por lo que aquellas concentraciones por debajo del valor promedio encontrado sobre la superficie de AT y valores de pH, coincidieron en la zona de baja concentración de oxígeno en la parte costera de la cabeza y Oeste del GT (Figs.8.6.1 y 8.6.2).

### 9.6.3 Análisis en la Vertical de pH y AT; relación del pH con la temperatura, salinidad y oxígeno.

El pH y la temperatura tienen una estructura en la vertical similar, debido a que en la zona eufótica, la radiación solar calienta el agua, por lo que a mayor temperatura se incrementa la disociación del bicarbonato y la fotosíntesis utiliza el  $\text{CO}_2$  simultáneamente para aumentar el pH mediante la reacción:  $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{OH}^-$ . En las aguas profundas, la reacción ocurre en la dirección opuesta (Figs.8.6.5a y b) (Zirino *et al.*, 1997; Hernández Ayón *et al.*, 2003).

La temperatura al influir sobre las constantes de disociación sobre el sistema dióxido de carbono-ácido carbónico-bicarbonato, modifica el pH en el agua de mar, pero la extensión uniforme de las isopletras de igual concentración de AT presentes desde la superficie hacia la vertical, varían los sus niveles de concentración solo en la ubicación de aguas costeras hacia aguas mas oceánicas (Fig.8.6.4a). Esto sugiere que la temperatura y salinidad, no son responsables directos del cambio del pH a lo largo de la columna de agua muestreada en Tehuanos II, sino que más bien los cambios de pH hacia una AT alta, o bien, los cambios en la cantidad de carbono inorgánico, son debidos más por los procesos biológicos que por físicos (mezcla, salida de  $\text{CO}_2$ , surgencia y hundimientos) (Hernández-Ayón *et al.*, 2003). Como relativamente se rompe con el esquema de la correlación de temperatura y salinidad con el pH, que en teoría se supone a mayor temperatura y salinidad menor solubilidad del dióxido de carbono, que provocaría una menor solubilidad del bicarbonato, pero con una mayor disociación, por lo que aumento AT (Millero, 1996; Hernández-Ayón *et al.*, 2006).

La temperatura tuvo una mayor correlación con el pH que la salinidad, debido a que la relación con la salinidad es dada a través de la AT, donde los valores de ambos parámetros tienen una distribución similar. Al permanecer casi constantes en la horizontal, varían solo con respecto a la latitud y a factores externos propios de la localidad, como los Tehuanos, es por eso que en la zona eutrófica la relación de distribución pH-salinidad es a la inversa (de menor a mayor salinidad y de mayor a menor pH) (Figs.8.6.5a y b; Figs.8.6.6a y b).

La relación pH-oxígeno mostró un descenso de pH asociado a la disminución de concentración de oxígeno; apoyando la idea de la migración vertical del fitoplancton y el uso de  $O_2$  por respiración, el cual tiene como producto la formación de  $CO_2$ . La reducción de oxígeno puede estar también asociada a la oxidación de la materia orgánica, que conlleva de igual forma a la liberación de  $CO_2$ .

Las relación de distribución de pH-temperatura que cambió a 1,500 m de profundidad, se asocia al incremento de concentración de oxígeno por la entrada de un flujo de agua rica en oxígeno originada como hundimiento de aguas a altas latitudes (Nybbaken, 2001).

La suma del  $CO_2$  formado por distintos procesos, lleva a la relación pH—dióxido de carbono Total ( $TCO_2$ ), la cual tuvo un  $R^2$  considerable de 0.84 (Fig.8.6.6d). Aún así, el  $TCO_2$  liberado parece haber sido insuficiente como para bajar los índices de pH dentro de la columna de agua eutrófica, ya que aún se encontraron valores máximos  $>8$  a lo largo de 0 – 100 m de profundidad (Tab.VIII.6.2; Fig.8.6.3b).

#### **9.6.4 Análisis en la Vertical de pH; relación pH — Densidad**

La  $R^2$  entre la densidad y temperatura resultó mayor que la de la densidad-salinidad (Figs.8.6.7a y b), indica que fue la temperatura la que controló la densidad al determinar la

estabilidad de la columna de agua (Hernández—Ayón *et.al.*, 2003). Como era de esperarse, al ser uno de los principales y el más evidente parámetro que tuvo un gradiente abrupto en sus valores ante la presencia de un Tehuano.

La  $R^2$  baja entre la densidad-pH y densidad—salinidad y el resultado de la densidad controlada por la temperatura, sugiere que el pH fue independiente de la temperatura y de la salinidad, lo que respalda la hipótesis de que los cambios de pH o bien el cambio del dióxido de carbono inorgánico total a lo largo de la columna de agua de GT durante Tehuanos II, se debieron más a los procesos biológicos de fotosíntesis y/o respiración.

Los procesos biológicos son controlados por la estabilidad de la columna de agua, los cuales aumentan al incrementarse la estabilidad. La estabilidad de la columna de agua se modifica por el grado de mezcla entre los estratos de agua, por lo que al relacionarse la surgencia con el ascenso de aguas con diferentes características que modifican en gran medida la mezcla de las masas de agua (Hernández—Ayón *et.al.*, 2003), se sugiere que durante el evento de viento de Tehuanos II, la presencia de una surgencia fue relativamente débil, al reportar valores de pH >8 aún a varios metros de profundidad dentro de la zona eutrófica, asociados a procesos biológicos.

La relación con respecto a los cambio del pH debidos a los procesos biológicos más que los físicos se halló en las costas de Baja California y aunque son ambientes completamente distintos, y en el GT se presentó un fenómeno de viento altamente variable, estas dos zonas se encuentran relacionadas con respecto a la temperatura, porque durante los Tehuanos la temperatura desciende y las aguas de Baja California son templadas, presentando ambas dentro de su columna de agua una estratificación moderada, relacionada su estabilidad con la PP que conlleva a los procesos de fotosíntesis y/o respiración (Hernández—Ayón *et al.*, 2003).

## **10 CONCLUSIONES**

Existió un gradiente en los valores y distribución espacial de los parámetros hidrológicos en el GT.

El cambio más evidente sobre la superficie del GT provocado por el Tehuano, se denotó en la distribución de la temperatura.

Se registró un enfriamiento superficial en la zona Centro y Oeste del GT, acarreadas por el desplazamiento hacia el occidente de la franja de agua fría, y un calentamiento en el Este del GT.

La distribución vertical de los parámetros químicos, permitió observar con mayor claridad el efecto de los vientos Tehuanos hacia las capas de agua superficiales dentro de la columna de agua eutrófica (0 - 100 m de profundidad).

Se encontró la deformación de la cresta de la termoclina ante el efecto del Tehuano evidenciada desde las primeras campañas al GT, con el hundimiento de 80 m de profundidad en la zona Oeste, 30 m en la zona Centro y 50 m en la zona Este.

En Tehuanos II se presentó una termoclina estacional a los 20 m de profundidad.

La termoclina promedio anual a los 50 m de profundidad, reportada en Tehuanos I, también estuvo presente en Tehuanos II después del evento de viento.

Se presentó alta salinidad en la zona Centro y Oeste que correspondieron a las propiedades de la ASTS.

Los valores máximos de PP medidos por Nájera-Martínez y Gaxiola-Castro, (2000) estuvieron dentro del orden de magnitud de los reportados durante invierno por otros autores pero, el orden de magnitud de concentración de oxígeno fueron mayores a los reportados durante otras campañas durante invierno.

La presencia de un parche fitoplanctónico ayudó a que en Tehuanos II existiera sobresaturación de oxígeno en comparación con otras campañas durante la reintensificación de los Tehuanos.

Las altas concentraciones en el centro y sobresaturación de oxígeno al Sureste del Golfo, complementan las mediciones de fitoplancton total y PP analizados por Nájera-Martínez *et al* (1997) y Nájera-Martínez y Gaxiola-Castro, (2000).

La oxiclina y nutriclina concordaron con la termoclina somera promedio anual del GT.

La nutriclina mostró un enriquecimiento preferentemente por aportes continentales.

En Tehuanos II se presentaron valores altos de pH y AT, cuyos cambios dentro de la columna de agua de 0-100 m de profundidad resulto independiente del gradiente de temperatura y pudo ser a los procesos biológicos (fotosíntesis y/o respiración).

La comparación de la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos *in situ* de Tehuanos II y su distribución espacial con respecto a otras campañas (meses de invierno, primavera y verano), permite mostrar que en Tehuanos II se conservaron las características de altos y bajos valores de los parámetros fisicoquímicos, así como su distribución correspondiente a la temporada de apogeo de los Tehuanos (Noviembre - Febrero).

La distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos en Tehuanos II, guardó una relación más estrecha con respecto al efecto mostrado por la intensidad de reforzamiento de viento, aunque de menor magnitud que se dio durante Julio (FIQUIMBI II).

El análisis comparativo de distribución espacial de los parámetros hidrológicos entre las diferentes campañas con respecto a Tehuanos II, sugiere que el evento de viento que tuvo lugar a finales de la temporada de apogeo de los Tehuanos (campaña Tehuanos II), tuvo un efecto similar ante el reforzamiento de los vientos pero de menor magnitud al presentado en el mes de Julio.

En Tehuanos II la surgencia se presentó con el enriquecimiento en la zona eutrófica de nutrientes y la deformación y compresión de las isopletras de los parámetros hacia las capas superficiales.

La comparación de la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos entre las diferentes campañas con respecto a las evidencias en la vertical en Tehuanos II, sugieren que las características mostradas en las capas superficiales del GT, parecen haber sido producto de fuerte mezcla entre las masas de agua superficiales (AST y ASTS) inducidos por los jets de viento, más que a la ascensión superficial de la surgencia.

Considerando que los datos obtenidos durante Tehuanos II fueron después del evento de viento iniciando el muestreo de Oeste a Este, el tiempo de reposición para las características hidrológicas típicas de la mayor parte del año del GT, fue mayor que durante Tehuanos I. Por lo que se esperaba que la termoclina fuese más profunda y valores de temperatura más altos durante Tehuanos II que Tehuanos I.

La distribución y el valor de las variables *in situ* entre Tehuanos I (Enero-Febrero) y Tehuanos II (Febrero), mostró que el efecto de viento en el último fue mayor.

Se observó incongruencia en el diámetro reportado de los 300 Km que alcanzó el remolino anticiclónico formado en Tehuanos II, al mostrar en su núcleo una periferia menos profunda de 80 m contra los 100 m de profundidad que alcanzo el remolino anticiclónico de 200 Km de diámetro dado en Tehuanos I.

La calma de los Tehuanos en Tehuano II, se hace evidente con la incursión del agua cálida proveniente de la zona Este hacia la Oeste de la cabeza del GT, que en Tehuanos I.

El gradiente en los valores de los parámetros hidrológicos durante Tehuanos II, mostró inconsistencia con lo reportado por Barton *et al.*, (2009), no en la forma de distribución sino en sus valores, que coincide con la incursión del agua cálida más hacia la cabeza del GT proveniente del lado Este acarreada por la CCCR, como efecto de la relajación de los vientos.

Las imágenes satelitales ofrecieron un panorama superficial general del efecto de los Tehuanos en cuestión de horas, el cual nos permitió observar la dinámica hidrológica.

Las temperaturas registradas por los satélites, fueron menores que las detectadas *in situ*, tanto para Tehuanos I como para Tehuanos II.

Los datos *in situ* aunque son obtenidos en días (lo que dura el crucero de investigación) pueden evidenciar con más detalle la causa de los Tehuanos sobre la superficie, ante el análisis del efecto sobre los parámetros hidrológicos extendiéndose hacia la vertical dentro del GT.

**BIBLIOGRAFÍA.**

- Alvarez, L. G., Badan-Dangon, A., y Valle, A. (1989). On coastal currents off Tehuantepec. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 29, pp. 89–96.
- Barton, E. D., y Coauthors. (1993). Supersquirt: Dynamics of the Gulf of Tehuantepec, México. En R. Romero-Centeno, y J. Zavala-Hidalgo, *Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal* Journal Of Climate. (Vol. 16).
- Barton, E. D., Lavín, M. F., y Trasviña, A. (2009). Coastal circulation and hydrography in the Gulf of Tehuantepec, México. *Continental Shelf Research*, 29, pp. 485-500.
- Benson, B.B. y Krause, D., Jr. (1984). The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolve in fresh water and seawater in equilibrium with the atmosphere, *Limnol Oceanography*., 29, 620.
- Blackburn, M. (1962b). An oceanographic study of the Gulf of Tehuantepec. En J. Färber-Lorda, M. F. Lavín, y M. A. Guerrero-Ruiz, *Effects of wind forcing on the trophic conditions, zooplankton biomass and krill biochemical composition in the Gulf of Tehuantepec*. Deep-Sea Research. (Vol.2), pp. 601–614.
- Bourassa, M., Zamudio, L., y O'Brien, J. (1999). Noninertial flow in NSCAT observations of Tehuantepec winds. J. Geophys. Res., En R. Romero-Centeno, y J. Zavala-Hidalgo, *Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal*. Journal Of Climate (Vol. 16), pp. 3628-3639.
- Brandhorts, W. (1958). Thermocline topography, zooplakton satanding crop, and mechanics of fertilization in the eastrn tropical Pacific. *Journal du Conseil* 24 (1), pp. 16-31.
- Bustos-Serrano, H. (1996). *Reporte hidrográfico de la Campaña Tehuanos II en el Golfo de Tehuantepec a bordo del B/O Altair*. Ensenada, Baja California: UABC-FCM.
- Chelton, D. F. (2000a). Satellite observations of the wind jets off the Pacific Coast of Central America. Part I: case studies and statistical characteristics. *Monthly Weather Review*, (Vol. 128), pp. 1993–2018.
- Chelton, D. F. (2000b). Satellite observations of the wind jets off the Pacific Coast of Central America. Part II: regional relationships and dynamical considerations. *Monthly Weather Review* (Vol. 128), pp. 2019–2043.
- Cifuentes-Lemus, J. L., Torres- García, M. D., y Frías M. M. (1997). *El Oceano y sus recursos II. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química*. 2ª ed. Ed. Fondo De Cultura Economica, México.

- Cifuentes-Lemus, J. L., Torres- García, P., y Frías M., M. (2003). *El Oceano y sus recursos III. Las ciencias del mar: oceanografía física, matemáticas e ingeniería*. 3ª ed. Ed. Fondo De Cultura Economica, México.
- Clarke, A. J. (1988). Inertial wind path and sea surface temperature patterns near the Gulf of Tehuantepec and Gulf of Papagayo,. En R. Romero-Centeno, y J. Zavala-Hidalgo, *Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal*. Journal Of Climate. (Vol. 16) pp. 2628-2639.
- Codispoti, L., y Packard, T. (1980). Denitrification rates in the East Tropical South Pacific. En F. Vázquez-Gutiérrez, G. Salvador López, Ramírez-Álvarez, M., Turner Garcés, A. Frausto Castillo, C., y H. Alexander Valdés, *La química del agua* Journal of Marine Research (Vol. 38), pp. 453-477.
- Crepon, M. R. (1982). Transient upwelling generated by two-dimensional atmospheric forcing and variability in the coast line. *Journal of physical Oceanography* (Vol. 12).
- De la Lanza-Espino, G. (2001). *Características Físico - Químicas de los mares de México 1.9.1*. 1ª ed., Ed. Instituto de Geografía-UNAM. México, D.F. pp. 51-69
- Emery, W. (1982). Mean Temperature-Salinity, Salinity-Depth and Temperature-Depth. Curves for the North Atlantic and North Pacific. *Progress in Oceanography*
- Färber-Lorda, J. L. (1994). Distribution and abundance of euphausiids in the Gulf of Tehuantepec during wind forcing. En J. Färber-Lorda, M. F. Lavín, y M. A. Guerrero-Ruiz, *Effects of wind forcing on the trophic conditions, zooplankton biomass and krill biochemical composition in the Gulf of Tehuantepec*. Deep-Sea Research. pp. 601–614
- Färber-Lorda, J., Lavín, M., y Guerrero-Ruiz, M. (2004). Effects of wind forcing on the trophic conditions, zooplankton biomass and krill biochemical composition in the Gulf of Tehuantepec. *Deep-Sea Research*, (Vol.2), 51, pp. 601-614.
- Fernández-Álamo, M. S.-A.-D.-L.-M. (2000). Copepod assemblages in the Gulf of Tehuantepec, México. Crustaceana. En J. Färber-Lorda, M. Lavín, y M. Guerrero-Ruiz, *Effects of wind forcing on the trophic conditions, zooplankton biomass and krill biochemical composition in the Gulf of Tehuantepec*. Deep-Sea Research. (Vol.2), pp. 601–614.
- Fernández-Álamo, M. A., y Färber-Lorda, J. (2006). Zooplankton and the oceanography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, (Vol. 69), pp. 318-359.
- Fiedler, P.C., (2002). Seasonal Climatologies and Variability of Eastern Tropical Pacific Surface Winds. En A. Frías-Velasco. *Regionalización de los Golfos de Tehuantepec, Papagayo,*

*Panamá y áreas adyacentes mediante la biomasa fitoplanctónica estimada a partir de imágenes de satélite.* Tesis de Licenciado en Biología Marina, UMAR.

- Frías-Velasco, A. (2004). *Regionalización de los Golfos de Tehuantepec, Papagayo, Panamá y áreas adyacentes mediante la biomasa fitoplanctónica estimada a partir de imágenes de satélite.* Puerto Angel, Oaxaca, México: Tesis de Licenciado en Biología Marina, UMAR. pp. 66.
- Gallegos-García A. y Barberán-Falcón J. Surgencia eólica. Cap. 3:27-34. En: M. Tapia-García (Ed.). *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos.* Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. México. 1998.
- Gonzalez-Silvera, A., Santamaria-del-Angel, E., Millán-Núñez, R., y Manzo-Monroy, H. (2004). Satellite observations of mesoscale eddies in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo (Eastern Tropical Pacific). *Deep-Sea Research*, (Vol. 2), 51, pp. 587–600.
- Hernández Ayón, J.M., Zirino, A., Canino-Herrera, R., y Galindo-Bect, M. S. (2003). Relacion pH-densidad en el agua de mar. *Ciencias Marinas*, (Vol. 29), 4, pp. 497-508.
- Lavín, M. F.; Robles, J.M.; Argote, M.L.; Barton, E.; Smith, R.; Brown, J.; Kosro, M.; Trasviña, A.; Vélez, H.S.; García, J. (1992). Física del Golfo de Tehuantepec. *Ciencia y Desarrollo* 97–107.
- Lewis, E. y Wallace D. (1998). Program Developed for CO<sub>2</sub> System Calculations. CDIAC, Oak Ridge Tennessee, USA
- Lillesand, T. y Kiefer, R. (1994). Remote Sensing and Image Interpretation. En A. Frías Velasco, *Regionalización de los Golfos de Tehuantepec, Papagayo, Panamá y áreas adyacentes mediante la biomasa fitoplanctónica estimada a partir de imágenes de satélite.* Puerto Angel, Oaxaca, México: Tesis de Licenciado en Biología Marina, UMAR.
- Lluch Cota, S. E. (1995). *Variación espacio-temporal de pigmentos fotosintéticos en el Golfo de Tehuantepec derivados de datos de satélite (CZCS).* La paz, Baja California Sur, México: Tesis de Maestría en Ciencias. Con especialidad en Ciencias Marinas.
- Lluch-Cota, S.E., Alvarez-Borrego, S., Santamaría-del Ángel, E.M., Muller Karger, F.E. y Hernandez-Vazquez. (1997). El Golfo de Tehuantepec y áreas adyacentes: variación espacio temporal de pigmentos Fotosintéticos derivados de satélite. *Ciencias Marinas*, 23(3):329-340.
- McClain, Ch R.; Christian, J. R.; Signorini, S. R.; Lewis, M. R.; Asanuma, I.; Turk, D.; Dupouy, C. D. (2002). Satellite Ocean Color Observational of the Tropical Pacific Ocean. En A. Frías-Velasco, *Regionalización de los Golfos de Tehuantepec, Papagayo, Panamá y áreas*

*adyacentes mediante la biomasa fitoplanctónica estimada a partir de imagenes de satelite.* Puerto Angel, Oxaca, México: Tesis de Licenciado en Biología Marina, UMAR. pp 66.

- McCreary, J. P., Lee, H. S., y Enfield, D. B. (1989). The response of the coastal ocean to strong offshore winds: with applicaions to circulations in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo. *Journal of Marine Research* (Vol. 47), 1, pp. 81–109.
- McLellan, H. J. (1968). Elements of physical oceanography. En M. A. Monreal-Gómez, y D. A. Salas de León. *Dinámica y Estructura Termohalina*, Cap. 2: 13-26pp.
- Millero, F. (1996). Chemical Oceanography. En F. Vázquez-Gutiérrez, G. Salvador López, A. Ramírez-Álvarez, M. Turner Garces, A. Frausto Castillo, y H. Alexander Valdés. *La química del agua*. 2ªed. Ed. CRC Press, Inc. U.S.A. pp 585.
- Millero, F. (2006). The marine inorganic carbon cycle. *Chemical Reviews*, (Vol. 107), 27, pp. 308-341.
- Molina-Cruz, A., y Martínez-López, M. (1994). Oceanography of Tehuantepec, México, indicate by Radiolaria remains. En M. A. Monreal-Gómez, y D. A. Salas de León. *Dinamica y Estructura Termohalina*.
- Monreal-Gómez, M. A., y Salas de León, D. A. Dinamica y estructura termohalina, Cap. 2: 13-26: En M. Tapia-García (Ed.), *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*, 240pp. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México,
- Müller Karger, F., y Fuentes-Yaco, C. (2000). Characteristics of wind-generated rings in the eastern tropical Pacific Ocean. En A. Gonzalez-Silvera, E. Santamaria-del-Angel, R. Millàn-Nuñez, y H. Manzo-Monroy, *Satellite observations of mesoscale eddies in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo ( Eastern Tropical Pacific)*. Deep-Sea Research (Vol. 2).
- Nájera-Martínez, S. (1992). Manual de practicas de laboratorio para el curso de técnicas en Oceanografía Biológica. Productividad y Fitoplancton. Comunicaciones Académicas, Serie Ecología, CICESE. CIECP9201. 28pp.
- Nájera-Martínez, Gaxiola-Castro, G. y Hungar-Sierra Delia G. (1997). *Fitoplancton del Golfo de Tehuantepec*. Informe Técnico. Comunicaciones Académicas, Serie Ecología, CICESE. CTECT9703. 17 pp.
- Nájera-Martínez, S. y Gaxiola-Castro, G.(2000). *Biomasa y Produccion del fitoplancton en el Golfo de Tehuantepec, México*. Informe Técnico. Comunicaciones Académicas, Serie Ecología, CICESE. CTECT20007. 31pp.

- Nybbaken, J. W. (2001). *Marine Biology: and ecological approach*. 5ª ed Ed. Benjaming Cummings. Unites States of America. pp. 9-14.
- Owen, R.W.y Zeitzschel B. (1970). Phytoplankton production: seasonal change in the oceanic eastern tropical Pacific. *Marine Biology*.7. 32-26.
- Palacios, D. M., y Bograd, S. J. (2005). A census of Tehuantepec and Papagayo eddies in the northeastern tropical Pacific. *Geophysical Research Letters*. (Vol. 32), pp. 1-4.
- Pennington, J. M. (2006). Primary production in the eastern tropical Pacific: a review. En M. A. Fernández-Álamo, y J. Färber-Lorda, *Zooplankton and the oceanography of the eastern tropical Pacific: A review* Progress in Oceanography. pp. 318–359.
- Popoca-Arellano, E. (2003). *Efectos del viento y Temperatura superficial del mar sobre la distribución Espacio- Temporal de las capturas atún aleta amarilla (Thunnus albacares) en el Golfo de Tehuantepec*. México.: Tesis de Licenciatura. UABC-FCM.
- Quijano-Rovirosa, E. (2007). *"Procesos de mesoescala en el Golfo de Tehuantepec, Oaxaca"* . Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California-FCM. Ensenada Baja Clifornia, México. pp. 69
- Reyes-Hernández, C., y Murad, P. (2005). Estructura Hidrográfica del Golfo de Tehuantepec, en Septiembre del 2004; crucero, TEHMA04. *Sesion especial; Oceanografia y Meteorologia del Golfo de Tehuantepec. GEOS*. (Vol 25). Ensenada, BC. pp. 246.
- Robles-Jarero, E. G., y Lara-Lara, J. R. (1993). Phytoplankton biomass and primary productivity by size of classes in the Gulf of Tehuantepec, México.( Vol. 15), 2, pp. 1341-1358.
- Roden, G. (1961). Sobre la circulacion producida por el viento en el Golfo de Tehuantepec y sus efectos sobre las temperaturas superficiales. En M. L.-R. Jaime Färber-Lorda, *Effects of wind forcing on the trophic conditions, zooplankton biomass and krill biochemical composition in the Gulf of Tehuantepec*. Geofísica Internacional.
- Romero-Centeno, R., y Zavala-Hidalgo, J. (2003). Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal. *Journal of Climate*, (Vol. 16) 15, pp. 2628-2639.
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., y Raga, G. B. (2007). Midsummer GaWinds and Low-Level Circulation over the Eastern Tropical Pacific. *Journal Of Climate*,(Vol. 20), pp. 3768-3784.
- Rodríguez-Rubio E. y Stuardo J. (2002). Variability of photosynthetic pigments in the colombian Pacific ocean and its relationship with wind field using ADEOS-1 data. En A. Frías-Velasco. *Regionalización de los Golfos de Tehuantepec, Papagayo, Panamá y áreas*

*adyacentes mediante la biomasa fitoplanctónica estimada a partir de imágenes de satélite.* Tesis de Licenciado en Biología Marina, UMAR.

- Salvador, L.G. (1993). Estudio del sistema del Dióxido de Carbono en el Golfo de Tehuantepec, durante la época de lluvias (1990-1). Tesis de Licenciatura.- ENEP Zaragoza-UNAM. En Vázquez-Gutiérrez *et al.* *La química del agua*. Cap. 4: 35-50.
- Sasai, Y., Sasaki, H., Sasaoka, K., Ishida, A., y Yamanaka, Y. (2007). Marine ecosystem simulation in the eastern tropical Pacific with a global eddy resolving coupled physical-biological models. *Geophysical Research Letters*, (Vol. 34), pp. 1-6.
- Schultz, D. M. (1997). The 1993 superstorm cold surge: Frontal structure, gap flow, and tropical impact. En R. Romero-Centeno, y J. Zavala-Hidalgo, *Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal*. Journal Of Climate. (Vol. 16)
- Schultz, D. M., Bracken, E., y Bosart, L. F. (1998). Planetary- and Synoptic-Scale Signatures Associated with Central American Cold Surges. *Monthly Weath.* (Vol. 126), pp. 5-27.
- Steenburgh, W. J. (1998). The structure and evolution of gap outflow over the Gulf of Tehuantepec, México. En R. Romero-Centeno, y J. Zavala-Hidalgo, *Isthmus of Tehuantepec Wind Climatology and ENSO Signal*. Journal Of Climate. (Vol. 16)
- Strong, A. R. (1972). Satellite Detection of upwelling and cool water eddies. *8th International Symposium on remote sensing of environment*: Michigan: Environmental Research. pp. 1067-1081
- Stumpf, H. (1975). Satellite detection of upwelling in the Gulf of Tehuantepec, México. *Journal of Physical Oceanography*. (Vol. 5), pp. 383–388.
- Stumpf, H. G., y Legeki, R. V. (1977). Satellite observations of mesoscale eddy dynamics in the Eastern Tropical Pacific. *Journal of Physical Oceanography*. (Vol. 7), pp. 648–658.
- Tapia-García M y Gutiérrez-Díaz B. Recursos Pesqueros de los Estados de Oaxaca y Chiapas, Cap. 11: 149-162: En M. Tapia-García (Ed.) *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*. 240pp. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, 1998.
- Trasviña, A. (1991). Offshore wind forcing in a coastal ocean: observations and modelling of the Gulf of Tehuantepec, México. Tesis doctoral-Universidad de Gales, Gran Bretaña.
- Trasviña, A. E. (1995). Offshore winds forcing in the Gulf of Tehuantepec, México: the asymmetric circulation. *Journal of Geophysical Research*. (Vol. 100). 10.

- Trasviña, A. y Barton, E. D. (1997). Los "Nortes" del Golfo de Tehuantepec: la circulación costera inducida por el viento. *Union Geofísica Mexicana- Contribuciones a la Oceanografía de Física en México*.
- Trasviña, A., Barton, E. D., Vélez, H. S., y Brown, J. (2003). Frontal subduction of a cool surface water mass in the Gulf of Tehuantepec, México. *Geofísica Internacional*, (Vol. 42), 1, pp. 101-114.
- Uthermohl, H. (1958). Zur vervollkommung der quantitativen Phytoplankton Methodik. *Mitteilungen der Internationalen Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie*, 9: 1-38.
- Vázquez-Gutiérrez, F., Salvador López, G., Ramírez-Álvarez, A., Turner-Garcés, M., Frausto Castillo, A., y Alexander Valdéz, H. La química del agua, Cap. 4: 35-50. En M. Tapia-García (Ed.) *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*, 240pp. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, 1998.
- Willett, C. (1996). A study of anticyclonic eddies in the eastern in Tropical Pacific Ocean with integrated satellite, in situ and modeled data. Ph.D. En J. Färber-Lorda, M. Lavín, y M. A. Guerrero-Ruiz. *Effects of wind forcing on the trophic conditions, zooplankton biomass and krill biochemical composition in the Gulf of Tehuantepec*. Deep-Sea Research, (Vol. 2).
- Wyrtki, K. (1967). Circulation and masses of water in the Eastern Equatorial Pacific Ocean. En M. A. Monreal Gómez, y D. A. Salas de León, *Dinámica y estructura Termohalina*. Ed. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
- Zamudio, L., Hurlburt, H. E., Metzger, E. J., y Morey, S. (2006). Interannual variability of Tehuantepec eddies. *Journal of Geophysical Research-Oceans*. (Vol. 111).
- Zirino, A.; Hernández-Ayón, J. M.; Fuhrman, R. A.; Álvarez-Borrego, S. A.; Gaxiola-Castro, G.; Lara-Lara, R.; Bernste, R. (1997). Estimaciones superficiales de PCO<sub>2</sub> en el Golfo de California a partir de mediciones continuas de pH e imágenes de satélite. En J. M. Hernández-Ayón, A. Zirino, S. Marinone, R. Canino-Herrera, y M. S. Galindo-Bect, *Relación pH-densidad en el agua de mar*. Ciencias Marinas. (Vol. 29).
- <sup>1</sup>Star Media; *El Rincon del Vago*. (1998). Obtenido de Giros ciclónicos: Fenómenos atmosféricos. Circulación atmosférica. Acción del viento. Espiral de Ekman. Efecto de Coriolis. Atmósfera e hidrosfera: HYPERLINK <http://html.rincondelvago.com/giros-ciclonicos.html>

<sup>2</sup>CIIFEN. (Marzo, 2008). *Centro Internacional para la Investigacion del Fenomeno de El Niño (CIIFEN)*. Recuperado en Septiembre de 2008, desde HYPERLINK [http://www.naylamp.dhn.mil.pe/noticias/Boletines%20CIIFEN/CIIFEN Analisis Marzo 2008.pdf](http://www.naylamp.dhn.mil.pe/noticias/Boletines%20CIIFEN/CIIFEN_Analisis_Marzo_2008.pdf)

<sup>3</sup>Trasviña-Castro, A. (n.d.). *La circulación costera del Pacífico Tropical Oriental, con énfasis en la Alberca Cálida Mexicana (ACM)*. Recuperado en 2008, desde: HYPERLINK <http://bcs.cicese.mx/trasvi/Biblio/12COLOMBIA2002publicado.pdf>

<sup>4</sup>Wikipedia, enciclopedia libre. (n.d.). *Efecto Coriolis*. Recuperado en Diciembre de 2009, desde HYPERLINK [http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_Coriolis](http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Coriolis)

<sup>5</sup>*Parametros Fisico-Quimicos: Alcalinidad*. (s.f.). Obtenido de HYPERLINK <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alcalinidad.pdf>