



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



# APLICACIÓN DEL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA DEL ERS-2 EN EL SUROESTE DEL GOLFO DE MÉXICO

## **TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN  
MANEJO DE RECURSOS MARINOS.

PRESENTA

ING. DIEGO GÁMEZ SOTO

LA PAZ, B. C. S., JUNIO DE 2012



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**  
**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 24 del mes de Mayo del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

**"APLICACIÓN DEL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA DEL ERS-2  
EN EL SUROESTE DEL GOLFO DE MÉXICO"**

Presentada por el alumno:

**GÁMEZ**

Apellido paterno

**SOTO**

materno

**DIEGO**

nombre(s)

Con registro:

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 1 | 0 | 0 | 0 | 7 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|

Aspirante de:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**

Directores de Tesis

**DR. BERNARDO SHIRASAGO GERMÁN**

Director de Tesis

**DR. MACLOVIO OBESO NIEBLAS**

2º. Director de Tesis

**DR. ALBERTO SÁNCHEZ GONZÁLEZ**

**DR. MARCIAL ARELLANO MARTÍNEZ**

**DR. ÁNGEL RAFAEL JIMÉNEZ ILLESCAS**

**PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES**

**DRA. MARÍA MARGARITA CASAS VALDEZ**



**I.P.N.  
CICIMAR  
DIRECCIÓN**





## INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 29 del mes Mayo del año 2012  
el (la) que suscribe ING. DIEGO GÁMEZ SOTO alumno(a) del

Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro A100075 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. BERNARDO SHIRASAGO GERMÁN y DR. MACLOVIO OBESO NIEBLAS

y cede los derechos del trabajo titulado:

"APLICACIÓN DEL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA DEL ERS-2

EN EL SUROESTE DEL GOLFO DE MÉXICO"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: arawing 02@hotmail.com - bshirasago@ipn.mx - mniebla@ipn.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

*Gámez Soto Diego*

ING. DIEGO GÁMEZ SOTO

*nombre y firma*

# **Dedicatoria**

Dedico este trabajo especialmente a mis padres, a los cuales nadie les enseñó a ser padres y sin embargo siento en mi corazón, que hicieron un excelente trabajo, dándome todo su apoyo, confiando y creyendo en mí en todo momento.

A mis hermanos que siempre predicaron con el ejemplo convirtiéndose en grandes profesionales en sus ramas respectivas, a mis amigos y compañeros de Mochis y de La Paz que compartieron momentos buenos y malos conmigo, algunos a pesar de la distancia siempre estuvieron ahí.

Finalmente pero no menos importante dedico este trabajo a Dios quien hoy y siempre me brinda bendiciones y me da fuerza para seguir adelante.



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer especialmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa Interinstitucional de Formación de Investigadores (PIFI) por los apoyos económicos brindados en estos dos años, sin los cuales no hubiese podido llevar a cabo tan notable trabajo.

También doy gracias a todo el Personal Administrativo y Docente del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional (CICIMAR-IPN) por todo su apoyo, en especial al Departamento de Servicios Escolares quienes mostraron en todo momento disposición para ayudar, así como a los profesores Dr. Ángel Jiménez Illescas, Dr. Sergio Troyo Dieguez y Dr. Enrique Nava Sánchez quienes durante dos años, me guiaron con sus clases, consejos y sugerencias. Para mis directores de tesis los Doctores en Ciencias Bernardo Shirasago German y Maclovio Obeso Nieblas, mi agradecimiento mas sincero, quienes a pesar de las adversidades y los tropiezos me ayudaron a seguir adelante tanto en lo académico como en lo personal y así convertirme en una mejor persona y en un respetable Maestro en Ciencias.

Por ultimo agradezco a las siguientes agencias espaciales, Agencia Espacial Europea, Agencia Espacial Canadiense y a la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (por sus siglas en ingles ESA “European Space Agency”, CSA “Canadian Space Agency”, NASA “National Aeronautics and Space Administration”), por suministrar por medio de sus sitios web, en manuales y artículos información importante y útil para el desarrollo de esta tesis y por ultimo al equipo de soporte de Array System Computing Inc. (Incorporación de Sistemas de Matriz de Informática) por apoyarme con soporte y entrenamiento remoto.

| <b>ÍNDICE GENERAL</b>                                                 | <b>Página</b> |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS</b>                                               | <b>I</b>      |
| <b>LISTA DE TABLAS</b>                                                | <b>VIII</b>   |
| <b>GLOSARIO</b>                                                       | <b>IX</b>     |
| <b>RESUMEN</b>                                                        | <b>XIII</b>   |
| <b>ABSTRACT</b>                                                       | <b>XIV</b>    |
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b>                                                | <b>1</b>      |
| <b>II. ANTECEDENTES</b>                                               | <b>2</b>      |
| <b>III. JUSTIFICACIÓN</b>                                             | <b>9</b>      |
| <b>IV. OBJETIVO GENERAL</b>                                           | <b>11</b>     |
| 4.1 Objetivos particulares                                            | 12            |
| <b>V. ÁREA DE ESTUDIO</b>                                             | <b>12</b>     |
| <b>VI. MATERIAL Y MÉTODOS</b>                                         | <b>15</b>     |
| 6.1 Procesamiento de Imágenes SAR.PRI (ERS-2)                         | 15            |
| 6.2 BestW (Envisat and ERS SAR Toolbox)                               | 16            |
| 6.3 Filtrado con ER Mapper                                            | 17            |
| 6.4 Procedimiento ENVI (Environment for Visualizing Images)           | 19            |
| <b>VII. RESULTADOS</b>                                                | <b>21</b>     |
| 7.1 Imágenes SAR.PRI                                                  | 21            |
| 7.2 Imágenes del 28 de septiembre 1999                                | 21            |
| 7.3 Imágenes del 7 de octubre 1999                                    | 30            |
| 7.4 Imágenes del 10 de octubre 1999                                   | 43            |
| 7.5 Imágenes del 13 de octubre 1999                                   | 50            |
| 7.6 Imágenes del 14 de octubre 1999                                   | 55            |
| 7.7 Cálculo del Coeficiente Normalizado de Retrodispersión $\sigma^0$ | 65            |
| 7.7.1 Derrames o Manchas Naturales (Chapopoterías)                    | 65            |
| 7.7.2 Derrames o Manchas Causadas por la Actividad Petrolera          | 68            |
| <b>VIII. DISCUSIÓN</b>                                                | <b>77</b>     |
| <b>IX. CONCLUSIONES</b>                                               | <b>92</b>     |
| <b>X. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS</b>                       | <b>93</b>     |
| <b>XI. BIBLIOGRAFÍA Y SITIOS DE INTERÉS</b>                           | <b>94</b>     |



|             |                                                                                                         |            |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>XII.</b> | <b>ANEXOS</b>                                                                                           | <b>110</b> |
| <b>A</b>    | <b>EI SATÉLITE DE SENSORAMIENTO REMOTO EUROPEO 2<br/>(ERS-2) Y EL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR)</b> |            |
| A.1         | El Satélite de Sensoramiento Remoto Europeo 2 (ERS-2)                                                   | 110        |
| A.2         | Sensores                                                                                                | 111        |
| A.3         | Principios del Radar de Apertura Sintética (SAR)                                                        | 113        |
| A.4         | El Radar de Apertura Sintética (SAR)                                                                    | 114        |
| A.5         | Apertura Real del SAR                                                                                   | 116        |
| A.6         | Instrumentos (Componentes del Sistema SAR)                                                              | 117        |
| A.7         | Señal Electromagnética (Pulse Chirp)                                                                    | 118        |
| A.8         | Cambio en la Fase Inducido por el Movimiento del Sensor<br>(Efecto Doppler)                             | 129        |
| A.9         | Estructura de la Señal SAR Transmitida (Modulada)                                                       | 131        |
| A.10        | Estructura de la Señal SAR Recibida (Demodulada)                                                        | 133        |
| A.11        | La Ecuación del Alcance (Rango)                                                                         | 133        |
| A.12        | Geometría del SAR                                                                                       | 134        |
| A.13        | Algoritmos de procesamiento del SAR                                                                     | 137        |
| A.14        | Algoritmos de Procesamiento Actuales                                                                    | 138        |
| A.15        | Procesamiento del SAR                                                                                   | 141        |
| A.16        | Ruido Speckle                                                                                           | 144        |
| A.17        | Estimadores                                                                                             | 146        |
| A.18        | Filtros de Reducción de Speckle                                                                         | 147        |
| A.19        | Concepto de Vistas Múltiples                                                                            | 149        |
| A.20        | Ventajas y limitantes del SAR                                                                           | 151        |

## LISTA DE FIGURAS

## Página

|                   |                                                                                                                                                               |    |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b>  | Zona de estudio Bahía de Campeche, Golfo de México                                                                                                            | 13 |
| <b>Figura 2.</b>  | Ubicación de la Sonda de Campeche.                                                                                                                            | 15 |
| <b>Figura 3.</b>  | Ubicación de las imágenes SAR.PRI, en el área de estudio                                                                                                      | 16 |
| <b>Figura 4.</b>  | Imagen virtual donde se localiza el paso descendente del 28 de septiembre de 1999.                                                                            | 21 |
| <b>Figura 5.</b>  | Imagen 01O232122893177 del 28 de septiembre (cuadro a). Vórtices en Rollo (VR).                                                                               | 22 |
| <b>Figura 6.</b>  | Imagen 02O232122893195 del 28 de septiembre (cuadro b). Vórtices en Rollo (VR). Chapopotera de 2.4 km (círculo).                                              | 22 |
| <b>Figura 7.</b>  | Imagen 03O232122893213 del 28 de septiembre (cuadro c del paso). Vórtices en Rollo. Chapopotera de 4.8 Km (círculo). Puntos brillantes.                       | 23 |
| <b>Figura 8.</b>  | Subimagen de la imagen 03O232122893213. Algunas plataformas petroleras de la Sonda de Campeche.                                                               | 23 |
| <b>Figura 9.</b>  | Imágenes virtuales de la imagen 03O232122893213. a) Georeferenciación del cuadro en el MVN. b) Detección de plataformas petroleras en el MVN.                 | 24 |
| <b>Figura 10.</b> | Imagen virtual de la imagen 03O232122893213. Sonda de Campeche visualizada en el MVN. Las zonas brillantes corresponden a las chimeneas de gas.               | 25 |
| <b>Figura 11.</b> | Imagen 04O232122893231 del 28 de septiembre (cuadro d del paso). VR de menor longitud. Desembocaduras de los ríos Gonzalez, Grijalva y San Pedro y San Pablo. | 26 |
| <b>Figura 12.</b> | Imagen virtual 04O232122893231. Georeferenciación del cuadro “d” en el MVN, donde se observa una importante dispersión de sedimentos.                         | 27 |

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 13.</b> | Imagen virtual 04O232122893231. Georeferenciación del cuadro en el MVN, se observa un transporte litoral de sedimentos de forma muy significativa.                                                                                                                      | 27 |
| <b>Figura 14.</b> | Subimagen de la imagen 04O232122893231. Comparación imagen SAR y MVN. Desembocaduras de los ríos Gonzalez, Grijalva y San Pedro y San Pablo.                                                                                                                            | 28 |
| <b>Figura 15.</b> | Subimagen de la imagen 04O232122893231. Comparación imagen SAR y MVN. Frentes de los ríos Grijalva y San Pedro y San Pablo (izquierda a derecha).                                                                                                                       | 29 |
| <b>Figura 16.</b> | Imagen virtual donde se localiza el paso ascendente del 7 octubre de 1999.                                                                                                                                                                                              | 30 |
| <b>Figura 17.</b> | Mosaico 1. Imágenes del 7 de octubre 1999 paso ascendente.                                                                                                                                                                                                              | 31 |
| <b>Figura 18.</b> | Imagen SAR 07O233347100405 del 7 de octubre (cuadro e del paso). Fenomenología oceánica y atmosférica.                                                                                                                                                                  | 32 |
| <b>Figura 19.</b> | Subimagen de la imagen 07O233347100405. Firmas frontales de forma ondulatoria dividiendo tres zonas A, B y C, con diferente valor de retrodispersión.                                                                                                                   | 33 |
| <b>Figura 20.</b> | Subimagen 07O233347100405. Remolino ciclónico (RC) perturbando un derrame de petróleo de 20 Km.                                                                                                                                                                         | 34 |
| <b>Figura 21.</b> | Subimagen 07O233347100405. Giro atmosférico ciclónico de 13 Km (círculo). Celdas convectivas atmosféricas alrededor del frente de vientos (flechas).                                                                                                                    | 35 |
| <b>Figura 22.</b> | Imagen 06O233347100387 del 7 de octubre (cuadro f del paso). Zona central del frente de vientos. Estructuras que poseen líneas oscuras o de baja retrodispersión.                                                                                                       | 36 |
| <b>Figura 23.</b> | Primera subimagen de la imagen 06O233347100387, zona central del frente de vientos. Zona A estructuras influenciadas por la presencia de la corriente costera permanente (CCP), remolino ciclónico (RC) y tren de ondas internas atmosféricas (OIA). Zona B de muy baja |    |



|                   |                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                   | retrodispersión (zona oscura) con celdas convectivas atmosféricas (CCA).                                                                                                                                                                               | 37 |
| <b>Figura 24.</b> | Segunda subimagen de la subimagen 06O233347100387, Corriente costera permanente (CCP), remolino ciclónico (RC), ondas Internas atmosféricas (OIA), celdas convectivas atmosféricas (CCA) y frente de vientos (FV).                                     | 38 |
| <b>Figura 25.</b> | Tercera subimagen de la imagen 06O233347100387, zona oeste del frente de vientos. Líneas oscuras relacionadas con la CCP y CCA.                                                                                                                        | 39 |
| <b>Figura 26.</b> | Imagen 05O233347100369 del 7 de octubre (cuadro g del paso). Parte sur de la zona del frente de vientos (FV), corriente costera permanente (CCP), celdas convectivas atmosféricas (CCA), vórtices en rollo (VR) y parte este de la Laguna de Términos. | 40 |
| <b>Figura 27.</b> | Primera subimagen de la imagen 05O233347100369. Celdas convectivas atmosféricas (CCA), líneas oscuras propias de la corriente costera permanente (CCP) y embarcaciones (puntos brillantes con alto nivel de retrodispersión).                          | 41 |
| <b>Figura 28.</b> | Segunda subimagen de la imagen 05O233347100369. Líneas oscuras paralelas a la parte oceánica de la Laguna de Términos sobrepuestas a las líneas asociadas a la CCP, CCA y ondas dentro de la laguna.                                                   | 42 |
| <b>Figura 29.</b> | Imagen virtual donde se localiza el paso ascendente del 10 octubre de 1999.                                                                                                                                                                            | 43 |
| <b>Figura 30.</b> | Imagen 10O233771010405 del 10 de octubre (cuadro h del paso). Vórtices en Rollo (VR) en toda la imagen.                                                                                                                                                | 44 |
| <b>Figura 31.</b> | Imágenes 09O233771010387 del 10 de octubre (cuadro i del paso). Vórtices en Rollo (VR) en toda la imagen. Dentro del círculo se observan dos barcos mediante puntos brillantes.                                                                        | 44 |

|                   |                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 32.</b> | Imágenes virtuales de la imagen 09O233771010387. a) Cuadro georeferenciado en el MVN. b) Algunas plataformas de la Sonda de Campeche.                                                                                                 | 45 |
| <b>Figura 33.</b> | Subimagen 09O233771010387. Algunas plataformas de la Sonda de Campeche (flechas) y barcos (círculo), en la imagen SAR.                                                                                                                | 46 |
| <b>Figura 34.</b> | Imagen 08O233771010369 del 10 de octubre (cuadro j del paso). Áreas de interés (en círculos), plataformas petroleras (A), filamentos de petróleo y barco (B), frente del río Grijalva (C) y frente del río San Pedro y San Pablo (D). | 47 |
| <b>Figura 35.</b> | Imágenes virtuales de la imagen 08O233771010369. a) Georeferenciación del cuadro el MVN. b) Detección de un grupo de plataformas en petroleras en el MVN. c) Detección de plataformas petroleras en la imagen SAR.                    | 48 |
| <b>Figura 36.</b> | Subimagen de la imagen 08O233771010369. Comparación entre la imagen SAR y el MVN. Desembocaduras de los ríos Grijalva, San Pedro y San Pablo.                                                                                         | 49 |
| <b>Figura 37.</b> | Imagen virtual donde se localiza el paso ascendente 13 de octubre.                                                                                                                                                                    | 50 |
| <b>Figura 38.</b> | Imagen 14O234201310405 del 13 de octubre (cuadro k del paso). Detección de filamentos de petróleo (círculos) y barcos (rectángulos).                                                                                                  | 51 |
| <b>Figura 39.</b> | Subimagen de la imagen 14O234201310405. Detección de 3 barcos en movimiento y su estela.                                                                                                                                              | 51 |
| <b>Figura 40.</b> | Imagen 13O2342013100387 del 13 de octubre (cuadro l del paso). Detección de filamentos de petróleo.                                                                                                                                   | 52 |
| <b>Figura 41.</b> | Imagen 12O234201310369 del 13 de octubre (cuadro m del paso). Remolino ciclónico (A), zona frontal (B), remolinos asociados a la estructura frontal (C y D).                                                                          | 53 |

|                   |                                                                                                                                                                                        |    |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 42.</b> | Subimagen 11O234201310351 (cuadro n). Desembocadura del Río Tonalá (A). Zona frontal formada por el sistema Río Tonalá-Laguna del Carmen, Pajonal y Machona (B).                       | 54 |
| <b>Figura 43.</b> | Imagen virtual donde se localiza el paso descendente 14 de octubre.                                                                                                                    | 55 |
| <b>Figura 44.</b> | Mosaico 2 paso descendente del 14 de octubre de 1999.                                                                                                                                  | 56 |
| <b>Figura 45.</b> | Imagen 15O2344114103177 del 14 de octubre (cuadro ñ), celdas de lluvia, poco intensas (valores considerables de retrodispersión). Vórtices en Rollo (VR).                              | 57 |
| <b>Figura 46.</b> | Imagen 16O2344114103195 del 14 de octubre (cuadro o), celdas de lluvia intensas (valores bajos de retrodispersión). Vórtices en Rollo (VR).                                            | 58 |
| <b>Figura 47.</b> | Subimagen 16O2344114103195. Detección de Cayo Arcas y cuatro barcos petroleros.                                                                                                        | 59 |
| <b>Figura 48.</b> | Imagen 17O2344114103213 del 14 de octubre (cuadro p). Detección celdas de lluvia. Poco intensa (A). Relativamente intensa (B). Muy intensa (C). Sonda de Campeche (puntos brillantes). | 60 |
| <b>Figura 49.</b> | Subimagen 17O2344114103213. Sonda de Campeche y derrames superficiales de hidrocarburos (manchas oscuras).                                                                             | 61 |
| <b>Figura 50.</b> | Imagen 18O2344114103231 del 14 de octubre (cuadro p). Zona de la Laguna de Términos y fenómenos asociados. A) Boca del Carmen. B) Boca Puerto Real.                                    | 62 |
| <b>Figura 51.</b> | Primer subimagen 18O2344114103231. Zona de la Boca de Carmen. Zona frontal (A) y remolino ciclónico (B).                                                                               | 63 |
| <b>Figura 52.</b> | Segunda subimagen 18O2344114103231. Boca Puerto Real, altos valores de retrodispersión en la parte oceánica y detección el fondo en la laguna.                                         | 64 |

|                   |                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 53.</b> | Cálculo de $\sigma^0$ en imágenes SAR del 28 de septiembre 02O232122893195 (cuadro b) y 03O232122893213 (cuadro c). Chapopoterías de 2.4 Km y 4.8 Km encerradas en los círculos.              | 65 |
| <b>Figura 54.</b> | Subimágenes chapopoterías con sus respectivas áreas de interés. Chapopotería 2.4 Km en la imagen 02O232122893195 (cuadro b). Chapopotería 4.8 Km en la imagen 03O232122893213 (cuadro c).     | 66 |
| <b>Figura 55.</b> | Cálculo $\sigma^0$ en la imagen SAR del 7 octubre 07O233347100405 (cuadro g). Chapopotería de 20 Km encerrada en el círculo.                                                                  | 67 |
| <b>Figura 56.</b> | Subimagen 07O233347100405 (cuadro g). Chapopotería de 20 Km con tres áreas de interés para el cálculo de $\sigma^0$ .                                                                         | 67 |
| <b>Figura 57.</b> | Filamento de petróleo detectado en la imagen 08O233771010369 del 10 de octubre (cuadro j).                                                                                                    | 68 |
| <b>Figura 58.</b> | Subimagen de la imagen 08O233771010369 del 10 de octubre (cuadro j). Filamentos de petróleo de 1.68 Km (superior) y 2.7 (inferior), con tres áreas de interés para el cálculo de $\sigma^0$ . | 69 |
| <b>Figura 59.</b> | Imágenes SAR del 13 de octubre, 14O234201310405 (cuadro k) y 13O2342013100387 (cuadro l). Cálculo de $\sigma^0$ filamentos causados por la actividad petrolera.                               | 70 |
| <b>Figura 60.</b> | Subimagen de la imagen 14O234201310405 (cuadro k) del 13 de octubre. Filamentos detectados el 14 de octubre, enumerados y con sus respectivas áreas de interés.                               | 71 |
| <b>Figura 61.</b> | Subimagen de la imagen 13O2342013100387 (cuadro l) del 13 de octubre. Filamentos detectados enumerados y con sus respectivas áreas de interés.                                                | 71 |
| <b>Figura 62.</b> | Imágenes SAR del 14 de octubre 16O2344114103195 (cuadro o) y 17O2344114103213 (cuadro p). Cálculo de $\sigma^0$ en filamentos causados por la actividad petrolera.                            | 74 |



|                   |                                                                                                                                                                                                          |     |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 63.</b> | Subimagen de la imagen 16O2344114103195 (cuadro o) del 14 de octubre. Reducida contaminación superficial en Cayo Arcas. Área de interés círculo “A”. Los buques tanque están encerrados en los círculos. | 74  |
| <b>Figura 64.</b> | Subimagen de la imagen 17O2344114103213 (cuadro p) del 14 de octubre. Contaminación superficial causada actividad petrolera, en la Sonda de Campeche.                                                    | 75  |
| <b>Figura 65.</b> | Campo de vientos del 28 de septiembre de 1999, en paso descendente.                                                                                                                                      | 78  |
| <b>Figura 66.</b> | Imagen de temperatura superficial del mar (TSM) del sensor NOAA-AVHRR del 28 de septiembre 1999. Se observa una cobertura de nubes muy importante (color negro).                                         | 79  |
| <b>Figura 67.</b> | Campos de vientos evidenciando zonas frontales de vientos. a) 12 de octubre y b) 15 de octubre.                                                                                                          | 81  |
| <b>Figura 68.</b> | Imagen de color verdadero (true color) MODIS Land Rapid. Se observan remolinos de material biológico o surfactante.                                                                                      | 83  |
| <b>Figura 69.</b> | Satélite ERS-2 carga útil dispositivos activos (AMI “Active Microwave Instrument”) y pasivos.                                                                                                            | 112 |
| <b>Figura 70.</b> | Concepto de Apertura Sintética                                                                                                                                                                           | 116 |
| <b>Figura 71.</b> | Esquema grafico de los componentes del sistema SAR. A/D (Análogo/Digital) y Tx/Rx (Transmitir/Recibir).                                                                                                  | 118 |
| <b>Figura 72.</b> | Generación de la Señal Chirp.                                                                                                                                                                            | 120 |
| <b>Figura 73.</b> | Demodulación Coherente.                                                                                                                                                                                  | 120 |
| <b>Figura 74.</b> | Señal Recibida (Rx).                                                                                                                                                                                     | 121 |
| <b>Figura 75.</b> | Señal Rx almacenada y señal demodulada almacenada.                                                                                                                                                       | 122 |
| <b>Figura 76.</b> | Rango de compresión de la señal recibida.                                                                                                                                                                | 123 |
| <b>Figura 77.</b> | Reflector puntual en la memoria de la computadora                                                                                                                                                        | 124 |
| <b>Figura 78.</b> | Comportamiento de la señal del sistema SAR. (a) Objetivo fijo. (b) Objetivo alejándose a velocidad constante.                                                                                            | 125 |

|                   |                                                                                             |     |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 79.</b> | Cambio de fase inducido por el movimiento del sensor.                                       | 126 |
| <b>Figura 80.</b> | Frecuencia Doppler a partir del cambio a partir del cambio en la fase.                      | 127 |
| <b>Figura 81.</b> | Ancho de banda Doppler total.                                                               | 128 |
| <b>Figura 82.</b> | Ejemplo de movimiento en línea recta de la plataforma.                                      | 134 |
| <b>Figura 83.</b> | Geometría del SAR.                                                                          | 135 |
| <b>Figura 84.</b> | Geometría del SAR distancias importantes.                                                   | 136 |
| <b>Figura 85.</b> | Geometría del SAR, observación lateral oblicua.                                             | 140 |
| <b>Figura 86.</b> | Eco de un objeto puntual en un sistema SAR.                                                 | 141 |
| <b>Figura 87.</b> | Compresión de un Reflector Puntual o Enfoque.                                               | 143 |
| <b>Figura 88.</b> | Tipos de polarización.                                                                      | 144 |
| <b>Figura 89.</b> | Imagen sin filtrar, obtenida por el sensor E-SAR sobre los alrededores de Múnich, Alemania. | 145 |

## LISTA DE TABLAS

## Página

|                 |                                                                                         |     |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 1.</b> | Valores $\sigma^0$ , chapopoterías detectadas el día 28 de septiembre.                  | 66  |
| <b>Tabla 2.</b> | Valores $\sigma^0$ , chapopotera detectada el día 7 de octubre.                         | 68  |
| <b>Tabla 3.</b> | Valores $\sigma^0$ , filamento detectado el día 10 de octubre.                          | 69  |
| <b>Tabla 4.</b> | Valores de $\sigma^0$ , filamentos detectados el día 13 de octubre.                     | 72  |
| <b>Tabla 5.</b> | Valores de $\sigma^0$ , filamentos detectados el día 13 de octubre.                     | 73  |
| <b>Tabla 6.</b> | Valores de $\sigma^0$ , contaminación superficial en Cayo Arcas y la Sonda de Campeche. | 76  |
| <b>Tabla 7.</b> | Características generales del SAR.                                                      | 112 |

## GLOSARIO

**Ancho de Banda Fraccionario.** Es una medida de la banda ancha de la antena, que varía entre 0 y 2, y a menudo es citado como un porcentaje (0% y 200%), cuanto más alto sea el porcentaje, mayor será el ancho de banda.

**Ángulo de Estrabismo.** Es la desviación angular del eje de una viga o la nula dirección de una antena en un eje específico o correspondiente.

**Azimut (Azimuth o Acimut).** Distancia a lo largo de la trayectoria de vuelo la cual puede variar de 6 a 30 m aproximadamente.

**Capa Límite.** Es la cual es la zona donde encuentra o se da la interfaz océano atmósfera.

**Chirrido (CHIRP).** Codificación de fase o modulación que se aplica al pulso de alcance en un radar generador de imágenes, diseñado para conseguir un producto tiempo-ancho de banda grande. La fase resultante es cuadrática en tiempo, la cual tienen una derivada lineal. A dicha codificación se le llama a menudo modulación lineal de frecuencia o lineal.

**Decibeles (dB).** Es una unidad relativa de una señal muy utilizada por la simplicidad al momento de comparar y calcular niveles de señales eléctricas o acústicas.

**Espectro Electromagnético.** Es la representación gráfica de todas las ondas electromagnéticas existentes.

**Frecuencia Bidimensional.** Es aquella frecuencia capaz de contener más de una dimensión de un objeto muestreado.

**Modo de haz concentrado deslizante ("sliding").** El centro de rotación no está en el centro de la antena, sino más apartado de la escena iluminada, de manera que se puede cubrir una región más grande que en el caso del haz concentrado.

**Modo de haz concentrado o spotlight.** La antena se dirige durante todo el vuelo, es decir, se gira de forma correspondiente en la dirección del acimut, de manera que ilumine una misma área de la escena (punto "spot"). De esta manera se puede mejorar la resolución en la dirección del acimut en comparación con el modo de

imagen habitual (**sliding**), pero en este modo las dimensiones observadas de la escena (de la superficie), reducen drásticamente su tamaño real.

**Número Digital.** Por sus siglas en inglés DN “Digital Number”, cifra numérica, por ejemplo entre 0 y 255, que se asigna a cada posición espacial de cuadrícula en el archivo que representa los niveles digitales de brillantez de una imagen.

**Onda Capilar.** Son ondas en el orden de los centímetros ( $\lambda$  de 1 a 10 cm) creadas por el viento, las cuales crean una superficie rugosa en el mar.

**Ondas Internas.** Son ondas subsuperficiales que ocurren entre dos masas de aguas de diferentes densidades y son generadas en el océano por las mareas.

**Percepción Remota.** Es la técnica mediante la cual se puede adquirir información de un objeto sin tener contacto con él.

**Píxel (Picture Element).** El elemento de imagen, es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital, ya sea esta una fotografía, un fotograma de vídeo o un gráfico.

**RADAR.** Radio Detecting and Rangign “Detección y Medición de Distancias por ondas de Radio”.

**Rango (Range).** Distancia entre el sensor y el blanco. (Perpendicular a la trayectoria de vuelo, 26 m aproximadamente).

**RAR (Real Aperture Radar).** Radar de Apertura Real, fueron los primeros sistemas creadores de imágenes por microondas, los cuales fueron utilizados durante la II Guerra Mundial para detectar a bombardeos nocturnos.

**Razón de Repetición.** Son las repeticiones por minuto que se generan en el contador del oscilador coherente, los cuales separan los inicios de los pulsos en  $1/PRF$  (1 pulse/pulse repetition frequency), para ser controlados de manera precisa.

**Relación Señal a Ruido.** Es la diferencia en dB entre el nivel de la señal útil, y el nivel de ruido.

**Resonancia Bragg.** Retro-reflexión difusa intensificada debido a la combinación coherente de señales reflejadas desde una superficie rugosa que presenta una distribución periódica en la dirección de la propagación de onda y cuyo espaciamiento es igual a la mitad de la longitud de onda proyectada en la superficie. Es recomendable utilizar el término reflexión difusa Bragg, para evitar la confusión

con el proceso conocido como dispersión, referente a la propagación de ondas en que la velocidad depende de la longitud de onda.

**SAR (Synthetic Aperture Radar).** El Radar de Apertura Sintética es sensor activo, que opera en el rango de las microondas (Banda C), el cual es capaz de generar imágenes de alta resolución espacial de la superficie.

**ScanSar.** Es un modo de registro SAR en el cual se modifica periódicamente el haz de la antena para iluminar diferentes subfranjas ("subswaths") en la dirección del alcance, es decir, franjas dispuestas a diferentes distancias de la trayectoria de vuelo. Esto permite incrementar el ancho de la franja a costa de la resolución en la dirección del acimut. Este modo también se conoce por el nombre de "modo de franja ancha".

**Sección Transversal De Radar (RCS) - Radar Cross Section.** Es la medida que corresponde a un objeto detectable por un radar, es decir, mayor RCS indica que un determinado objetivo es más fácilmente detectable dada la señal que refleja al radar, esto depende de su composición.

**Sensores Activos.** Porta su propia fuente de energía, opera en el rango de las microondas, es independiente de la luz solar y es ideal en condiciones adversas (cobertura de nubes).

**Sensores Pasivos.** Son instrumentos que reciben la radiación emitida por una determinada superficie, dependen de fuentes externas de energía, y sus mediciones son perturbadas por condiciones adversas (cobertura de nubes).

**Señal Portadora.** Una onda o señal portadora es una forma de onda, generalmente sinusoidal, que es modulada por una señal que se quiere transmitir. Esta onda portadora es de una frecuencia mucho más alta que la de la señal moduladora (la señal que contiene la información a transmitir).

**$\sigma^0$  (Sigma Nought).** Parámetro normalizado obtenido de los números digitales resultantes de procesamiento de la señal del radar

**SNR (Signal-to-Noise Ratio).** El Ruido en la señal del radar, se define como la relación de energía, entre una señal (información significativa) y el fondo de ruido (señal no deseada), en otras palabras, se define como la relación de potencia de la señal a la potencia de ruido.



**Solitones:** Son soluciones clásicas de ecuaciones de campo no lineales que poseen energía finita, densidad de energía localizada y que viajan con una velocidad uniforme sin dispersión. Es una onda solitaria auto-reforzada (un paquete de ondas o impulsos) que mantiene su forma mientras viaja a velocidad constante. Los solitones son causados por la cancelación de los efectos no-lineales y de dispersión en el medio.

**Swath (Área de Barrido).** Ancho de la dimensión del alcance de la escena de la cual se ha formado una imagen, medido bien sea en el alcance terrestre o en alcance inclinado.

**Velocidad de Nyquist.** El teorema Nyquist requiere que se obtengan por lo menos dos muestras por cada ancho de la función de respuesta tipo impulso, a partir del procesamiento de los datos. Estas muestras son los “píxeles” de las imágenes de radar.

**Ventana Móvil.** Mapa raster donde se almacenan los píxeles que conforman la imagen, la cual se divide en regiones cartesianas que puede ser definidas por el usuario.

**Visión Oblicua.** Es aquella cuyas rectas proyectantes auxiliares son oblicuas al plano de proyección, estableciéndose una relación entre todos los puntos del elemento proyectante con los proyectados.

## RESUMEN

Se realizó un estudio con el Radar de Apertura Sintética (SAR) en el suroeste del Golfo de México, en la Bahía de Campeche, un cuerpo de agua de gran relevancia para el país. En ella descargan los ríos más caudalosos de México, el Coatzacoalcos y el Sistema Grijalva-Usumacinta, además de albergar la Sonda de Campeche, zona de alta producción petrolera. El periodo de estudio corresponde a los meses de septiembre y octubre de 1999, época caracterizada por marcadas condiciones adversas, debido a fuertes lluvias y consecuentes descargas de los ríos anteriormente mencionados. Se procesaron 18 imágenes SAR.PRI con programas especializados como BestW (Envisat and ERS Toolbox), ERMapper, Nest (Next ESA SAR Toolbox) y ENVI (Environment for Visualizing Images). Adicionalmente, en este estudio se analizaron los últimos avances científicos realizados dentro del programa ESA-ERS2, lo cual cubrió aspectos involucrados en el funcionamiento y operación del sensor SAR. En las imágenes SAR se detectaron fenómenos oceanográficos como frentes, remolinos, corrientes litorales y contaminación superficial causada por manchas de petróleo en la Sonda de Campeche, así como procesos atmosféricos, como lo son celdas de lluvia, frentes de viento, entre otros. Mediante el cálculo del Coeficiente Normalizado de Retrodispersión de Radar (Normalized Radar Backscattering Coefficient)  $\sigma^0$ , se obtuvieron valores para las manchas naturales de petróleo (chapopoterías), así como para las causadas por la propia actividad petrolera en la región.

Palabras clave: SAR, SAR.PRI, ERS2,  $\sigma^0$  (Normalized Radar Backscattering Coefficient).

## ABSTRACT

A study was conducted with the Synthetic Aperture Radar (SAR) in the southeastern Gulf of Mexico in the Bay of Campeche, a body of water of great importance for the country. In this place flow the mightiest rivers of Mexico, Coatzacoalcos and the Grijalva-Usumacinta system, also houses the Campeche Sound, an area of high oil production. The study period corresponds to the months of September and October 1999 period characterized by marked adverse conditions due to heavy rainfall and consequent river discharges referred to above. 18 images were processed with specialized programs like SAR.PRI BestW (Envisat and ERS Toolbox), ERMMapper, Nest (Next ESA SAR Toolbox) and ENVI (Environment for Visualizing Images). Additionally, this study analyzed the latest scientific advances made in the ESA-ERS2 program, which covered aspects involved in the functioning and operation of the SAR sensor. In SAR images were detected oceanographic phenomena such as fronts, eddies, coastal currents and surface contamination caused by oil slicks in the Campeche Sound, and atmospheric processes, such as cells of rain, wind fronts, among others. By calculating the Radar Backscatter Coefficient Standard (Normalized Radar Backscattering Coefficient)  $\sigma^0$ , it has been obtained for natural oil stains (natural sources of tar), as well as those caused by the activities of the oil companies in the region.

Keywords: SAR, SAR.PRI, ERS2,  $\sigma^0$  (Normalized Radar Backscattering Coefficient).

## I. INTRODUCCIÓN

La adquisición de información de la superficie de la Tierra es y ha sido fundamental para los científicos, quienes a través de la historia, han desarrollado instrumentos especializados para esta tarea. Uno de estos instrumentos es el Radar (Radio Detection and Ranging), el cual en sus inicios fue principalmente usado con fines militares (Segunda Guerra Mundial). Sin embargo, culminada la guerra el radar fue destinado a aplicaciones civiles, esto dio origen a la "Percepción Remota (Remote Sensing)". Esta disciplina fue ideada a principios de los 60's para designar cualquier método de observación remota de un objetivo, sin tener contacto con él. Una de las primeras técnicas fue la aplicación de la fotografía aérea, la cual permitió contar con información de vastas áreas de interés, pero no fue hasta el desarrollo de la tecnología espacial, que los científicos pudieron contar con plataformas de observación satelitales, las cuales cuentan con una variedad de sensores, capaces de proporcionar información en tiempo real de la superficie terrestre a una escala global (Chiuvienco, 2002).

La evolución tecnológica de los radares ha sido avanzada al grado que han aparecido sistemas altamente desarrollados, como el Radar de Apertura Sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*), que genera imágenes de la superficie terrestre en muy alta resolución (Reintjes y Godfrey, 1952).

Con el desarrollo del Radar de Apertura Sintética, se creó una herramienta para el estudio de los océanos, zonas terrestres, espacio aéreo y la exploración espacial. Los primeros ensayos con imágenes SAR provenientes de plataformas espaciales, se realizaron en el año de 1978, en el satélite SEASAT operado por la NASA (Beal *et al.*, 1981).

En la Oceanografía Física sus principales usos se enfocan en el estudio de las corrientes marinas, remolinos, frentes de viento, propagación de ondas internas, oleaje, mapeo de la topografía submarina, entre otros. A su vez, una de sus aplicaciones importantes, es la detección de contaminación marina causada por derrames de petróleo, así como filamentos causados por la limpieza y operación de barcos (Aguirre-Gómez, 2002).

Considerando estas aplicaciones en el estudio del ambiente marino, el uso de información proveniente del SAR, abordo de los diferentes satélites, ha sido muy limitado, ya que su interpretación es muy compleja y su precio es muy elevado. Asimismo, durante el proceso de obtención de las imágenes a las diferentes agencias espaciales, es necesario solicitarlas con meses de antelación para que activen el SAR en la zona correspondiente, ya que sus requerimientos energéticos son altos y la disponibilidad de éste es limitado, lo cual restringe su funcionamiento a una fracción relativamente pequeña de la órbita (Shirasago, 1996). La interpretación de datos obtenidos por SAR es muy compleja, debido a los fenómenos físicos involucrados en la obtención de los datos y al gran volumen de información correspondiente a cada imagen. En este trabajo de tesis, busca conocer el funcionamiento y operación de este sensor, para así comprender e interpretar de manera adecuada la información que suministra y poder realizar aplicaciones en el medio marino.

## **II. ANTECEDENTES**

Estudios previos han demostrado la utilidad del SAR en las aplicaciones marinas e incluso bajo cobertura de nubes, ya que debido a sus características de sensor activo, permiten el monitoreo del océano bajo tales condiciones. Fu y Holt (1982), marcaron las pautas para la aplicación del SAR, mediante el radar del SEASAT (1978), en la superficie terrestre. Sus esfuerzos se enfocaron principalmente en el ambiente marino, llevando a cabo análisis de fenómenos mesoescalares como corrientes oceánicas, remolinos y frentes.

Los sistemas SAR, son capaces de detectar cualquier cambio en la rugosidad del mar, esto es, del campo de ondas capilares, generada por procesos oceanográficos y atmosféricos. Las corrientes oceánicas y otras estructuras mesoescalares, forman parte de los fenómenos detectables por el SAR, ya que éstas van constantemente acompañadas, en sus límites o bordes, por cambios de rugosidad causados por tres mecanismos fundamentales: El primer mecanismo consiste en la acumulación de materiales tenso-activos de origen natural (biogénico), los cuales influyen en la tensión superficial del mar. Estos materiales

son concentrados por procesos de turbulencia, mismos que generan movimientos convectivos de las subsuperficie a la superficie y por lo tanto, zonas de convergencia alineadas en la dirección de las corrientes. Estos materiales causan una atenuación en las ondas capilares, lo que genera una reducción en la retrodispersión del radar y por lo tanto, la presencia de líneas o slick's oscuras en una imagen de radar.

El segundo mecanismo consiste en la interacción de las ondas superficiales directamente con los fenómenos marinos, que se manifiestan en la superficie (Lyzenga, 1991; 1998). Estas interacciones pueden causar un aumento o disminución de la rugosidad en la superficie del mar, dependiendo del tipo de fenómeno marino, ya sean corrientes, remolinos u otros, mismos que generan ya sea convergencias, divergencias y gradientes o cizalladuras, así como de la dirección de propagación de las ondas. Esto puede observarse o verse manifestado por medio de líneas claras u oscuras en la imagen SAR. En algunos casos, los cambios de longitud de onda y/o de dirección de ondas de mayor longitud, pueden ser observados directamente y utilizados para inferir las corrientes subsuperficiales (Sheres, 1982; Beal *et al.*, 1986; Barnett *et al.*, 1989).

El último mecanismo se debe a los efectos de la estabilidad de la capa límite atmósfera-océano, que interactúa con los gradientes de temperatura superficial, que con frecuencia acompañan a los sistemas de corrientes oceánicas, los cuales, dada la inestabilidad convectiva que presentan, éstas producen regiones donde la temperatura del aire es más baja que la temperatura del agua, ya que el aire en contacto con el agua sufre un calentamiento sobre la superficie del mar. Estas inestabilidades causan un aumento del esfuerzo del viento sobre la superficie del mar que, a su vez, aumenta la rugosidad superficial y por ende la retrodispersión de la señal del radar (Brown, 1990; Wu, 1991; Beal *et al.*, 1997).

Tomando en cuenta lo anterior, Shirasago (1996), realizó un estudio de circulación marina en el Mar de Alborán, encontrando qué fenómenos marinos y atmosféricos, eran detectados en la superficie del mar con imágenes SAR. Lyzenga y Marmorino (1998), llevaron a cabo un estudio utilizando un SAR aerotransportado, con el cual analizaron deferentes fenómenos (frentes de viento

y ondas internas), en una imagen SAR de 6.4 m de resolución en ciertas zonas de la Corriente del Golfo (Gulf Stream), demostrando la efectividad de los sistemas aerotransportados. Con respecto a estudios sobre corrientes marinas a mayor escala, se puede mencionar realizado con imágenes SAR/ERS-1 de la Corriente del Golfo (Ochadlick *et al.*, 1992; Gower, 1994), en que realiza un estudio de las formas de detección de esta corriente y sus remolinos asociados (ciclónicos y anticiclónicos).

Johannessen *et al.* (1996) realizaron una comparación de imágenes AVHRR y SAR/ERS-1 en la detección de remolinos ciclónicos y anticiclónicos en los fiordos de Noruega, encontrando una gran similitud debido a que estructuras con altos valores de retrodispersión en la imagen SAR, claramente asemejan a los remolinos detectados por el AVHRR. En el invierno de 1999, Martínez (2001) llevo a cabo un estudio de patrones de circulación superficial en la parte norte del Golfo de California, analizando dos imágenes SAR-ERS-2, encontrando meandros y giros anticiclónicos de diferentes tamaños, el más grande de 80 km los cuales concuerdan bien con la circulación de la época invernal en la parte norte del golfo descrita por Lavín *et al.* (1997). Este estudio contó con un reducido número de observaciones *in situ*, proporcionadas por boyas seguidas por satélite. Otros fenómenos detectados por el radar (aerotransportado o en órbita) son las corrientes de costa y los frentes (pluma de río) causados por las descargas de ríos altamente caudalosos (Lyzenga *et al.*, 1994; Mied *et al.*, 2002).

Otra de las aplicaciones importantes del SAR, es el monitoreo de contaminación superficial (derrames de petróleo). El hidrocarburo (aceite mineral), que flota en la superficie del mar, no siempre procede de las plataformas petroleras, refinerías, terminales de petróleo o plantas industriales, si no que en ocasiones es de otras fuentes como son los derrames naturales provenientes del fondo del mar (chapopoterías), así como de la limpieza de sentinas y problemas en la operación de los barcos (Espedal y Johannessen, 2000).

Uno de los usuarios más importantes de este tipo de imágenes para este tipo de aplicaciones, es el gobierno de Noruega, que por medio del servicio de monitoreo de derrames de hidrocarburos, controlado por el centro operativo de



Kongsberg Satellite Services “KSAT” (anteriormente estación de recepción de Tromsø), usa este tipo de imágenes (SAR.PRI de los satélites RADARSAT y ENVISAT), para monitorear la contaminación de aceites y petróleo provocados por la limpieza de los buques en el mar. Esto se lleva a cabo, principalmente, en zonas de extracción petrolera cercanas a sus costas o en el ambiente marino (Pedersen *et al.*, 1996; Wismann *et al.*, 1998). Otras naciones, también cuentan con este servicio.

Algunos estudios han estimado que el 0.25% de la producción mundial de petróleo termina en el océano, considerando a las actividades de explotación y transporte de hidrocarburos por buques, como la principal contribución de contaminantes, los cuales por diferentes motivos terminan por desechar efluentes (todo tipo de aceite que proviene de plantas industriales), durante su travesía (Lean y Hinrichsen, 1999).

Imágenes SAR obtenidas por los satélites ERS-1 y 2, RADARSAT-1 y 2, se han utilizado ampliamente para la obtención de información estadística sobre la contaminación por hidrocarburos (Gade y Alpers, 1999; Lu *et al.*, 1999, 2000). Este tipo de imágenes satelitales son muy útiles en la localización de las zonas (“hot spots”) donde los barcos son lavados, pues mientras se lleva a cabo esta actividad, varios efluentes, son vertidos al mar. Pavlakis *et al.* (2001), realizaron un estudio donde analizaron 1600 imágenes del sensor SAR del Mar Mediterráneo, encontrando una drástica contaminación por hidrocarburos procedentes de buques en esta zona marítima, la cual está designada como una área especial de acuerdo con el Convenio MARPOL73/78 (Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques, 73/78).

Respecto a las aplicaciones del Radar de Apertura Sintética en México, desafortunadamente han sido pocas, en comparación con otros países que hacen mayor uso de este tipo de tecnología. Si embargo, Pellón de Miranda *et al.*, (2004), llevaron a cabo un análisis en el Golfo de México, de los datos suministrados por el SAR a bordo del RADARSAT-1, los cuales se usaron para monitorear las actividades de los derrames ocurridos el 28 de Julio y 23 de

Noviembre de 2000, así como en los días 22 y 23 de Julio de 2001, en el complejo Cantarell, en la Sonda de Campeche.

Con respecto al oleaje de gravedad en el océano, en la década de los 70's se demostró por primera vez la capacidad de detección de oleaje, iniciando con SAR aerotransportados, hasta el uso de plataformas espaciales. González *et al.* (1980) y Beal (1980), analizaron en detalle la capacidad de detección de oleaje del SEASAT/SAR, demostrando resultados satisfactorios en el desarrollo de métodos de detección y espectros de ondas. Beal *et al.* (1983) dedicaron considerables esfuerzos en la medición y evolución espacial de los espectros de ondas, al este de EE.UU.

Por otra parte, el primer reconocimiento de ondas internas, las cuales son un fenómeno que ocurre en la superficie, se le atribuye a Russell (1838, 1844), quien informó sobre la formación de una protuberancia única o montículo en aguas poco profundas del Canal de Escocia. Posteriormente, Korteweg y De Vries, (1895) derivaron algunas de las interesantes propiedades matemáticas de dicha onda y produjeron el método de soluciones para solitones (ondas internas en estrechos). En el Estrecho de Gibraltar se han detectado ondas internas que son generadas por las mareas hacia el oeste del Umbral de Camarinal, estas ondas poseen una dimensión de 200 km (Apel, 2000).

Con la ayuda de modelos teóricos, tanto de hidrodinámica como de mediciones de superficies resultantes de la dispersión que causa la onda electromagnética, es posible obtener imágenes cuasi-tridimensionales de las ondas internas. Estas se encuentran entre los principales fenómenos oceánicos que se estudian con el SAR, ya sea con sistemas aerotransportados o en órbita, siendo detectadas por medio de las variaciones en la dispersión registrada por la sección transversal del radar (área geométrica del radar), proveniente de la cresta de la ola (Elachi y Apel, 1976).

Las surgencias son también un tema de interés, pero los casos son estudiados en su mayoría usando sensores pasivos como el SeaWiFS ("Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor", color de la superficie de los océanos "chl-a"), MODIS ("Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer", temperatura superficial

del mar, color del océano entre otros) o el AVHRR (“Advanced Very High Resolution Radiometer”, temperatura superficial). En el caso del SAR, algunos estudios han mostrado que los patrones de afloramiento que se obtienen por medio de dos mecanismos clave: el primero, es la reducción de la rugosidad de la superficie del mar debido a la menor temperatura superficial del mar, lo que genera un menor esfuerzo del viento. Las aguas más frías, como resultado del afloramiento, pueden generar cambios importantes en la estabilidad de la capa límite marina, así como en la densidad del agua superficial, en relación con las aguas circundantes. El menor estrés producido por el viento aumenta la estabilidad, debido a la presencia de agua más fría, por lo tanto existe un amortiguamiento constante de la onda capilar, esto contribuye a la reducción de la Resonancia Bragg, lo cual crea zonas de baja retrodispersión en las imágenes SAR.

El segundo mecanismo, son las manchas de material biogénico (surfactantes), las cuales amortiguan la rugosidad de la superficie del mar, causados por la actividad biológica, asociada a la mayor concentración de nutrientes en las aguas de surgencia. La interpretación de las imágenes SAR en las regiones de surgencia, es por desgracia complicada por otros factores atmosféricos y oceánicos, tales como bajas velocidades del viento, lluvia o la presencia de material mineral surfactante, tensoactivo o emulsionante que también causan la aparición de las características anteriormente mencionadas (zonas oscuras en las imágenes por baja retrodispersión) (Clemente-Colón y Yan, 2000).

Por otra parte, es importante mencionar que de los datos procesados por el SAR en el formato SAR.PRI, se puede obtener el Coeficiente Normalizado de Retrodispersión de Radar (Normalized Radar Backscattering Coefficient) denominado  $\sigma^0$ , el cual es un parámetro único que se obtiene a partir de la señal retrodispersada hacia el radar. Esta señal requiere de procesos altamente complejos para convertirse en números digitales, los cuales son usados en diferentes algoritmos que implementan las diferentes agencias para determinación de dicho coeficiente.

Laur *et al.* (1993) realizaron un análisis de la saturación del ADC (Convertidor Análogo/Digital) del ERS-1 y 2, encontrando altos coeficientes de retrodispersión causados, tanto por el mar agitado, como por las grandes ciudades en Europa, el Atlántico y Groenlandia. Otra aplicación del cálculo de  $\sigma^0$  se realizó en el delta del Río Paraná en Argentina, donde por medio de un enfoque metodológico y analizando correcciones radiométricas y geométricas de las imágenes SAR, derivaron niveles de inundación (Frulla *et al.*, 1998). Años después la Agencia Espacial Japonesa (2002), anunció un método para realizar una calibración absoluta de productos SAR.PRI del JERS generados por la ESA, utilizando una escena de bosque tropical del Amazonas y suponiendo un  $\sigma^0$  de -7.74 dB para las plantas.

La lluvia es un fenómeno detectable por el SAR (Celdas de lluvia). La lluvia modifica considerablemente la rugosidad de la superficie del mar (onda capilar), provocando un cambio en la señal de retrodispersión, la cual es detectada y procesada por los sistemas de radar. La lluvia puede clasificarse en estratiforme o convectiva, los sistemas estratiformes, están caracterizados por flujos verticales de calor y de momento relativamente débiles. Suelen darse, por ejemplo, en las zonas cercanas al extremo de los frentes cálidos, en una zona de advección cálida. Ocupan extensiones muy grandes y tienden a producir lluvia débil y de larga duración. Los fenómenos caracterizados por flujos verticales turbulentos de calor y de momento como los aguaceros y las tormentas, son convectivos, estos ocupan extensiones del orden de un kilómetro cuadrado aproximadamente y tienden a ser intermitentes e intensos (Houze, 1997).

Las imágenes del ERS-1 y ERS-2 se han usado para identificar celdas de fuertes lluvias en el mar de Groenlandia; estas celdas, por lo general, tienen un diámetro entre 5 y 10 km y una duración de aproximadamente 10 a 30 minutos, pudiendo ocurrir individualmente o en grupos. Las que son superiores a los 70 km son llamadas superceldas.

En cuanto a la adecuada detección de estos fenómenos, generalmente la estratiforme es mucho menos intensa, pero más duradera que la convectiva, siendo ésta más débil y uniforme. Las celdas convectivas son más detectables en las imágenes SAR (Alpers y Melsheimer, 2004).

Con respecto a la circulación del Golfo de México, se puede mencionar que ésta es compleja, en la cual destaca el Sistema de Corrientes de Yucatán-Lazo-Florida, el cual genera grandes anillos anticiclónicos. La variabilidad de dicho sistema determina en gran parte la circulación general del golfo. El flujo de la Corriente de Yucatán varía temporalmente, presentando valores máximos en el mes de agosto y mínimos durante noviembre, con incrementos de marzo a mayo y disminución de junio a noviembre (Molinari y Behringer, 1978; Ochoa *et al.*, 2001; Sheinbaum *et al.*, 2002).

Por otra parte, la corriente del Lazo es la que sufre mayores variaciones en el plano horizontal del sistema, presentando intrusiones al interior del Golfo de México. La intrusión máxima se presenta durante el verano y otoño, ocurriendo la separación de un remolino anticiclónico de hasta 250 km de diámetro (Cochrane 1963; Leipper 1970; Nowlin y Hubertz 1972; Maul 1977). Este remolino viaja por todo el golfo e impacta contra las costas de Tamaulipas y Texas.

La Bahía de Campeche presenta una gran influencia de la Corriente de Lazo, ya que una parte del flujo que penetra a través del Canal de Yucatán, se desvía hacia el oeste y entra a ésta, siendo una de las principales causas de la generación de un remolino ciclónico durante el otoño, mismo que ocupa gran parte de la bahía (Monreal y Salas-de-León, 1990; Salas-de-León y Monreal-Gómez 2004).

### **III. JUSTIFICACIÓN**

El litoral del Golfo de México y del Caribe Mexicano, desde Tamaulipas (en la frontera con los Estados Unidos), hasta Quintana Roo (en la frontera con Belice), tiene en su conjunto una extensión de línea de costa externa cercana a los 2,270 km, sin embargo, si se considera la extensión de los márgenes internos de las lagunas, estuarios, desembocaduras y barreras costeras, a la cifra anterior

deben sumarse 4,900 km más, alcanzando con ello 7,670 km (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2004). Por lo anterior, el Golfo de México es considerado el noveno cuerpo de agua más grande del mundo.

El Golfo de México proporciona áreas de refugio, alimentación y reproducción de numerosas especies que representan una de las pesquerías ribereñas más importantes de México. Este tipo de sistemas productivos, mismos que se encuentran fuertemente influenciados por el ambiente, contribuyen con el 95% de las capturas de peces a nivel mundial. Este ecosistema marino enfrenta graves impactos por sobreexplotación de sus recursos vivos, cambios ambientales y contaminación, que se reflejan en destrucción de hábitats y baja producción de biomasa (Arriaga y Souza, 2006; Foro Regional Internacional, 2010). Asimismo, este sistema alberga lagunas muy productivas biológicamente hablando, como son la Laguna de Tamiahua, Ver., El Carmen y Machona, Tab., así como la Laguna de Términos, Cam., además de ubicar la zona de mayor producción petrolera de México que es la Sonda de Campeche.

Para México, cuya economía se encuentra profundamente vinculada con la extracción de energéticos, la Sonda de Campeche, misma que se localiza frente a las costas de los estados de Tabasco y Campeche, tiene una importancia crucial pues en ella se encuentran grandes yacimientos de petróleo y gas. Asimismo, en las costas ubicadas en el norte de los estados de Veracruz y el sur de Tamaulipas, también se localizan importantes yacimientos de hidrocarburos, así como una gran franja, en la base de las montañas que va desde el Río Pánuco hasta cerca del puerto de Veracruz (que tiene mucho petróleo pero poca presión). La explotación de estos recursos energéticos se realiza por medio de las plataformas petroleras, las cuales en la mayoría de los casos se construyen a cientos de kilómetros de las costas, donde los trabajadores de PEMEX (Petróleos Mexicanos) laboran y viven (Programa Sectorial de Energía, 2006). En algunas ocasiones, los accidentes en estas instalaciones no sólo han cobrado la vida de los petroleros, sino que también han provocado derrames y daños ecológicos de considerable magnitud a los ecosistemas donde se localizan (Arriaga y Souza, 2006).

Para el caso del Golfo de México, el ambiente se encuentra muy influenciado por la dinámica oceánica, la cual se encuentra dominada por la variabilidad del Sistema de Corrientes de Yucatán-Lazo-Florida. Lo anterior produce una compleja circulación en la Bahía de Campeche, cuerpo de agua de relevancia, ya que en ella descargan los ríos más caudalosos de México, como el Coatzacoalcos y el Sistema Grijalva-Usumacinta, cuyas descargas máximas son de 1,251 m<sup>3</sup>/s en septiembre y de 4,390 m<sup>3</sup>/s en octubre respectivamente, y son consideradas las más importantes de América del Norte después del Mississippi 30,000 m<sup>3</sup>/s (Yáñez-Arancibia y Sánchez-Gil, 1988).

Por lo anterior, es importante realizar estudios ambientales en esta región de gran relevancia biológica y económica, en especial con sensores remotos. Sin embargo, hay épocas en que las condiciones meteorológicas son muy adversas, con fuertes lluvias y vientos (verano-otoño), así como amplias zonas con coberturas nubosas. Considerando la relevancia biológica y económica de la Bahía de Campeche y las condiciones adversas que prevalecieron en el periodo de estudio, es de utilidad la aplicación de sensores activos (Radar de Apertura Sintética y Escaterómetro SeaWinds), mismos que presentan una mayor independencia de las condiciones meteorológicas y una importante especialización en la detección de contaminación por hidrocarburos, ya que los sensores pasivos, durante esta época de fuertes lluvias, proporcionan resultados limitados (Sánchez, 2011).

Finalmente, debido al interés en el desarrollo de la tecnología espacial en nuestro país, generado por la creación de la AEXA (Agencia Espacial Mexicana), se hace necesario un amplio conocimiento de la operación, funcionamiento y adquisición de datos, procedentes de diferentes sensores instalados en plataformas satelitales.

#### **IV. OBJETIVO GENERAL**

Detectar fenómenos atmosféricos y oceanográficos presentes en la Bahía de Campeche con datos de radar, así como las formas de retrodispersión que los describe. Lo anterior, durante los meses de septiembre y octubre de 1999,

dominados por condiciones atmosféricas adversas. Analizando así mismo, la contaminación por hidrocarburos superficiales causada por circunstancias naturales o por la actividad petrolera que se realiza en la Sonda de Campeche. Todo esto basado en el conocimiento del funcionamiento y procesamiento de datos del sensor SAR.

#### **4.1 Objetivos Particulares:**

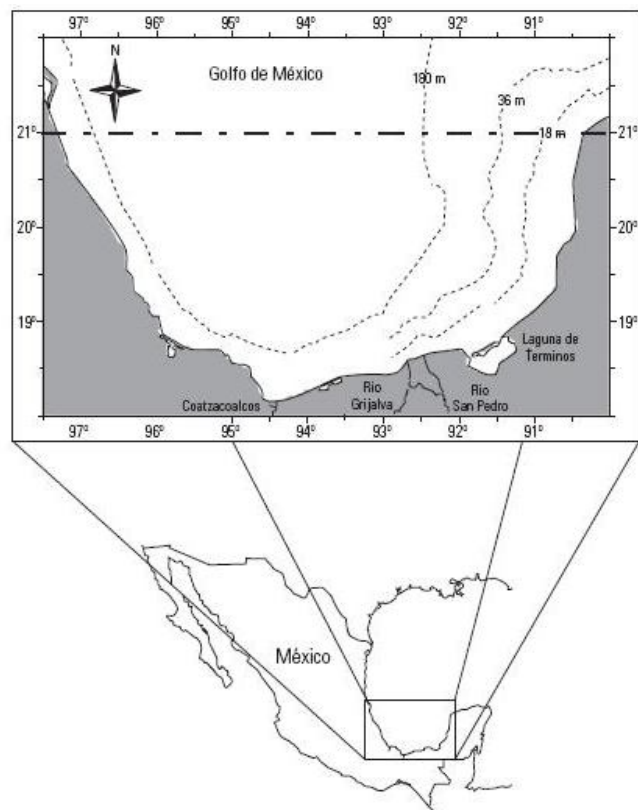
1. Realizar un estudio de la operación del SAR del satélite ERS-2, cubriendo aspectos como, instrumentos, tipos de señales que utilizan y fenómenos físicos involucrados en su funcionamiento, para así comprender su funcionamiento y operación.
2. Identificar las formas de detección de fenómenos oceanográficos y atmosféricos que comparten firmas de radar muy semejantes, como frentes tipo pluma de río y por vientos, corrientes, remolinos, vórtices en rollo y manchas de petróleo, por medio del análisis de los datos derivados de las imágenes de satélite, en la Bahía de Campeche.
3. Obtener y analizar los valores del Coeficiente Normalizado de Radar de Retrodispersión  $\sigma^0$ , en la detección de derrames de petróleo en la Sonda de Campeche y el estado de contaminación superficial en la zona, para determinar el impacto que causa la actividad petrolera.

#### **V ÁREA DE ESTUDIO**

La Bahía de Campeche está situada en la zona subtropical, al Suroeste del Golfo de México, entre 18° 06' y 21° 30' de latitud norte, así como 90° 06' y 97° 20' de longitud oeste (Fig. 1). Sus aguas tienen profundidades típicas que van desde los 200 m en su plataforma continental, hasta los 2,500 m en el centro de la bahía (Behringer *et al.*, 1977).

La mencionada bahía, tiene una longitud aproximada de 750 km de oeste a este y de norte a sur cerca de los 350 km, y su comunicación con el Golfo de México es a través de su frontera norte.





**Figura 1.** Zona de estudio Bahía de Campeche, Golfo de México.

La Bahía presenta un clima cálido sub-húmedo con 53.5% de humedad y cálido húmedo con un 41%, con una temperatura media anual de 23.5°C, una máxima de alrededor de 32°C en los meses de abril y mayo, así como una temperatura mínima de 13°C durante el mes de enero (INEGI, 2011). El régimen de precipitaciones en las costas del golfo, se caracteriza por tres periodos constantes que se traslapan de manera relativa: un periodo de secas de febrero a mayo, uno de lluvias de junio a octubre, con presencia de depresiones tropicales, y uno de frentes fríos o “nortes” de octubre a febrero. Con una precipitación anual que varía entre los 1,500 y 2,500 mm respectivamente (INEGI, 2010).

Los vientos son de gran importancia sobre la plataforma continental, generando corrientes a lo largo de la costa. En el oeste del Golfo de México, estas corrientes varían a lo largo del año, ya que los vientos cambian de dirección,

siendo predominantemente del suroeste durante el verano y del noreste en otoño e invierno (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003a). Durante el verano tienen una dirección perpendicular sobre la plataforma de Tamaulipas y Veracruz. En promedio, el rotacional del viento es positivo en la región norte y noroeste del golfo y negativo en la región suroeste, de la Bahía de Campeche (Sturges, 1993; Vázquez de la Cerda, 1993). Estas características inducen a la formación de un giro anticiclónico en el noroeste y una corriente de frontera occidental sobre el talud continental y un giro ciclónico en la Bahía de Campeche.

En el Golfo de México existen varios regímenes de oleaje, determinados por la influencia de las tormentas tropicales, los frentes fríos y el “fetch” de los vientos Alisios del noreste. En general, las olas alcanzan entre 1.4 y 2.3 m de altura (energía de baja a intermedia), con excepción de las generadas por los huracanes y los frentes fríos, cuyas alturas alcanzan a los 4.5 m (Lankford, 1977). Los vientos dominantes son las oleadas o rachas constantes de los alisios que provienen del sector nororiental durante todo el año, generando olas con períodos típicos de entre cinco y siete segundos, cuyas crestas oscilan alrededor de 1.5 m de altura. De esta forma, el oleaje incide predominantemente del este-noreste con una frecuencia de un poco más del 60% del total anual, mientras que las costas del Mar Caribe recibe el oleaje con direcciones comprendidas entre el noreste y suroeste, esencialmente bajo las mismas condiciones del oleaje típico de las cuencas semicerradas. Estas últimas pueden ser consideradas de baja y moderada energía, excepto en los nortes y huracanes, donde se han observado olas de más de 4.5 m de altura (Lankford, 1977).

El régimen de mareas en la Bahía de Campeche es diurna, desde la parte noreste de Yucatán hasta Río Coatzacoalcos y una marea mixta, con dominancia diurna, desde el noroeste del Río Coatzacoalcos hasta un poco al norte de Matamoros (Monreal-Gómez y Salas-de-León, 1997).

Finalmente, la Bahía de Campeche alberga a la Sonda de Campeche, la cual además de sus recursos pesqueros y su importancia para las actividades turísticas, posee una gran cantidad de yacimientos de petróleo y minerales que le otorgan un significativo valor económico. Ésta posee más de 100 plataformas

marítimas para la explotación petrolera, las cuales se localizan en la plataforma continental, con profundidades entre 180 a 200 m, y a una distancia aproximada de 150 km de la costa (Fig. 2).



**Figura 2.** Ubicación de la Sonda de Campeche.

## **VI Material y Métodos.**

### **6.1 Procesamiento de Imágenes SAR.PRI (ERS-2).**

Para el análisis SAR, se utilizaron 18 imágenes SAR.PRI (Precision Images o imágenes de precisión) proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA) en CD-ROMS, las cuales fueron obtenidas durante el mes de septiembre y octubre de 1999 (Fig. 3). Sus características son las siguientes:

- 8000 Píxeles por línea
- 8200 líneas
- Un tamaño del píxel 10 m (en rango/largo) y de 10 m (en acimut/dirección de vuelo del satélite)
- 16 bits (2 bytes) por píxel (Resolución Radiométrica)
- 63,075,600 bytes por imagen (63 megabytes aproximadamente).



**Figura 3.** Ubicación de las imágenes SAR.PRI, en el área de estudio.

La imagen de precisión (PRI) es el producto estándar de la ESA, para el análisis SAR de precisión radiométrica. A diferencia de otros productos está construida por medio de un proceso de vistas o multi look (speckle-reducido) las cuales son 3 en el caso del SAR/ERS-2. Este producto está calibrado y corregido por el patrón de la antena SAR y el rango de pérdida de propagación. El Coeficiente Normalizado de Retrodispersión  $\sigma^0$ , se puede derivar de los productos PRI, pero a pesar de que la imagen no está geocodificada y no incluyen correcciones para el terreno por el efecto inducido por radiométrica, es el mayormente usado por los usuarios interesados en aplicaciones de percepción remota satelital. Las Imágenes SAR fueron procesadas y manipuladas por medio de los siguientes sistemas de imágenes de satélite:

## **6.2 BestW (Envisat and ERS SAR Toolbox).**

El programa BestW (Envisat and ERS SAR Toolbox), es una interface Humano-Máquina (HMI "Human Machine Interface") que extrae los complejos datos almacenados en los CD-ROMS, los cuales pueden ser del SAR (Synthetic Aperture Radar) o ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), para ser procesados por medio otros programas especializados. Debido a que este programa no está diseñado para crear visualizaciones de las imágenes, es decir, solo podemos extraer datos y exportar o importar. El primer archivo en ser

extraído o descifrado de los CD-ROMS, es la Cabecera de Datos esta contiene toda la información descriptible del producto contenido en el CD, que será usada para la generación de las imágenes.

Las primeras imágenes generadas a partir de la cabecera de datos, son la de vista rápida (QL “Quick Look”) y la de vista previa (Imagen Preview “IP”). Éstas fueron usadas para la toma de decisiones, es decir, si contenían elementos o fenómenos de interés, a pesar del moteado speckle que contienen, lo que hace complicado su análisis. Para cada una de las 18 imágenes SAR.PRI, se generó el tipo de imagen denominada Full Resolution, la cual es muy relevante porque, a diferencia de las anteriores esta posee la máxima resolución, es decir, no es una imagen rápida o previa, si no la imagen obtenida del satélite y la que se usará en los sistemas descritos a continuación.

A esta imagen se le aplica un último ajuste antes de ser exportada usando las imágenes QL y PI, el cual consiste en aplicar un flip o giro en dos planos x-y y y-z, a las imágenes que fueron tomadas en el paso descendente, debido que la dirección de visualización del satélite es contraria al del paso ascendente. Para el caso de estudio se utilizaron ambos giros. Al finalizar el uso de BestW, se exportó la imagen final (full extraction), en formato Tiff.

### **6.3 Filtrado con ER Mapper.**

Con la imagen Tiff full resolution, se usó ER Mapper, en primer instancia para detectar si la imagen estaba correctamente orientada (flip procedure). Este sistema posee una función automática que detecta si la imagen está correctamente girada, por medio de la profundidad de pixeles, ya que esta profundidad cambia al girar una imagen que no lo necesitaba. Este procedimiento ayudó a tratar las imágenes sin error.

ER Mapper permitió usar diferentes algoritmos de filtros de radar para imágenes SAR, para eliminar el Moteado Speckle. De los 29 filtros disponibles, se usó “std\_dev\_1.6.ker”, mediante el cual aplica un arreglo Gaussiano, con una desviación estándar de 0.625. Este filtro se aplica antes de cualquier submuestreo de datos, ya que elimina satisfactoriamente dicho Moteado Speckle. Como

resultado, se obtuvo una imagen libre de ruido la cual permitió una mejor detección de fenómenos marinos y atmosféricos.

#### **6.4 Georeferenciación con ER Mapper y Nest (Next ESA SAR Toolbox).**

Con el sistema Nest, se procesaron los datos derivados de BestW, para crear máscaras y bandas virtuales, las cuales serán de ayuda para la detección de manchas de petróleo y objetos tales como barcos o plataformas petroleras. También permitió registrar la posición de las imágenes SAR.PRI, en el área de estudio (MVN "Mapa Virtual Nest"). Estos mapas virtuales están compuestos por imágenes Tematic Mapper de la serie de satélites LANSAT.

Para georeferenciar las imágenes SAR.PRI, fue necesario utilizar en conjunto los procesadores ER Mapper y Nest. La georeferenciación consiste en trasladar la información de una imagen (píxeles), a un plano de coordenadas terrestres. En otras palabras, se refiere al posicionamiento con el que se define la localización de un objeto espacial en un sistema de coordenadas y datum determinado. Para lo anterior se utilizó el asistente para el Geocoding de ER Mapper, con el cual se capturó información referente a la imagen a georeferenciar. Para el presente estudio, se logró georeferenciar todas las imágenes utilizando la información contenida en la Metadata, la cual se generó junto con la Tiff full resolution (imagen Tiff de resolución completa). La Metadata a diferencia de la Cabecera de Datos, contiene solo la información referente a una sola imagen e incluyen información importante como el número de órbita, el tipo de paso ascendente o descendente, número de columnas y filas, puntos de control para llevar a cabo la georeferenciación, constante de calibración y tipo de producto.

También el sistema Nest permite la georeferenciación de las imágenes, lo cual permitió que pudiese comprobarse lo obtenido con ER Mapper. Sumado a esto, se usaron los mapas virtuales antes mencionados, para posicionar las imágenes en la zona de estudio, ubicando principalmente la Sonda de Campeche, La Laguna de Términos y los ríos Grijalva y San Pedro. Asimismo, por medio de estos mapas virtuales, se crearon mosaicos para analizar la continuidad de las imágenes (cuadros), en su paso correspondiente.

## 6.5 Procedimiento ENVI (Environment for Visualizing Images).

ENVI proporcionó herramientas para la creación de diagramas espectrales, y algoritmos para el cálculo del coeficiente normalizado  $\sigma^0$ , los cuales serán aplicados directamente a las imágenes SAR.PRI. El procesador ENVI es una herramienta principalmente usada para análisis multiespectrales. Es un programa construido sobre un lenguaje IDL (es un lenguaje que permite definir una serie de interfaces para la comunicación entre dos o más aplicaciones), especializado de datos multidimensionales y su visualización, se diferencia de otros programas similares (MATLAB, por ejemplo), en que contienen funciones especialmente adaptadas al trabajo con información territorial o geográfica.

Dentro de las funciones y herramientas de ENVI para el tratamiento de datos SAR.PRI, se cuenta con la creación de imágenes  $\sigma^0$ . A diferencia de los programas anteriores que usaban información derivada de BestW, como base para el tratamiento de las imágenes SAR.PRI, en ENVI usaremos directamente la información almacenada en los CD-ROMS.

Los CD contienen una carpeta de nombre SCENE1, dentro de ella se encuentra el archivo DAT\_01.001. Este archivo se utiliza para la generación de la imagen  $\sigma^0$ , por medio de un algoritmo interno de ENVI. Los números digitales (Digital Number "DN") son convertidos a valores en decibels, el cual es una unidad relativa, para comparar o calcular niveles de diferentes señales, pero aplicado a radar, estos serán niveles de señales eléctricas, siendo el resultado una imagen constituida por valores  $\sigma^0$ . Para corroborar los valores obtenidos por el ENVI, se realizaron pruebas usando el siguiente algoritmo:

$$\sigma^0 [\text{dB}] = 10 \cdot \log \left( \frac{\text{PRI\_DN}^2 \cdot \sin(\alpha)}{K} \right)$$

- 10.log se usa la para la conversión a decibels.
- PRI\_DN<sup>2</sup> es la única variable en la ecuación.

- $\sin(\alpha)$  es el ángulo de incidencia de la señal electromagnética ( $23^\circ$ ).
- K es la constante de calibración del radar (944061), dada por la ESA para el ERS-2.

Para identificar las imágenes SAR.PRI, se le agregó la siguiente nomenclatura 01O232122893177, la cual se desglosa de la siguiente manera: 01 es el número de la imagen; O23212 es la órbita; 28 el día; 9 el mes; 3177 el cuadro. Los mapas virtuales de Nest (MVN) son de gran ayuda para la posición de los diferentes pasos, y por ende la de las imágenes. Para resaltar la detección de fenómenos atmosféricos y oceanográficos, se usaron diferentes polígonos como círculos, óvalos y rectángulos. Los cuales son detectables en las imágenes SAR, por cambios en la rugosidad de la superficie del mar, la cual es influenciada por la capa límite atmosfera-océano. En presencia de vientos poco intensos o muy intensos, la respuesta del radar es altamente precisa, sin embargo, vientos menores a 2 m/s causan pérdida de información. Vientos mayores a 20-30 m/s causan una saturación en el sensor SAR.

En el caso de las manchas o derrames de petróleo, y para la detección de objetos como barcos y plataformas petroleras, de igual manera se usaron los polígonos mencionados. Pero en el cálculo de  $\sigma^0$ , para las manchas de petróleo en las figuras, se usaron polígonos para referenciar las áreas de interés.

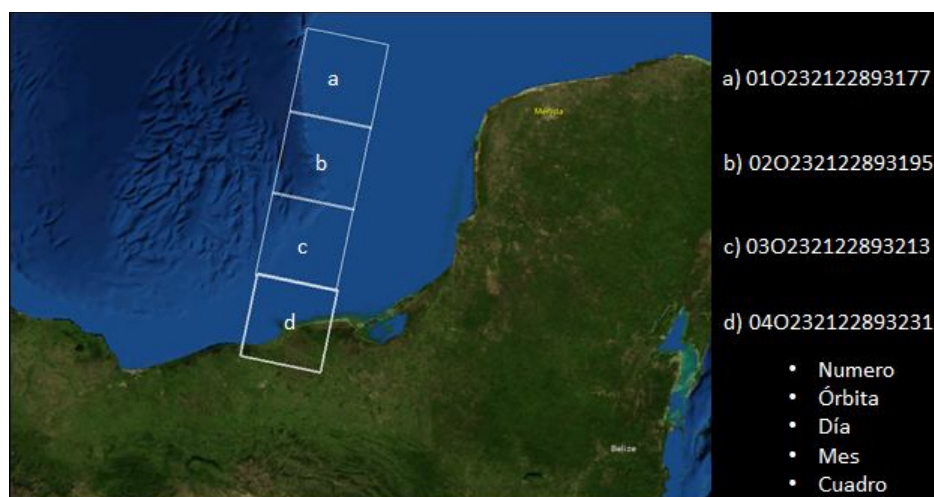


## VII Resultados.

### 7.1 Imágenes SAR.PRI.

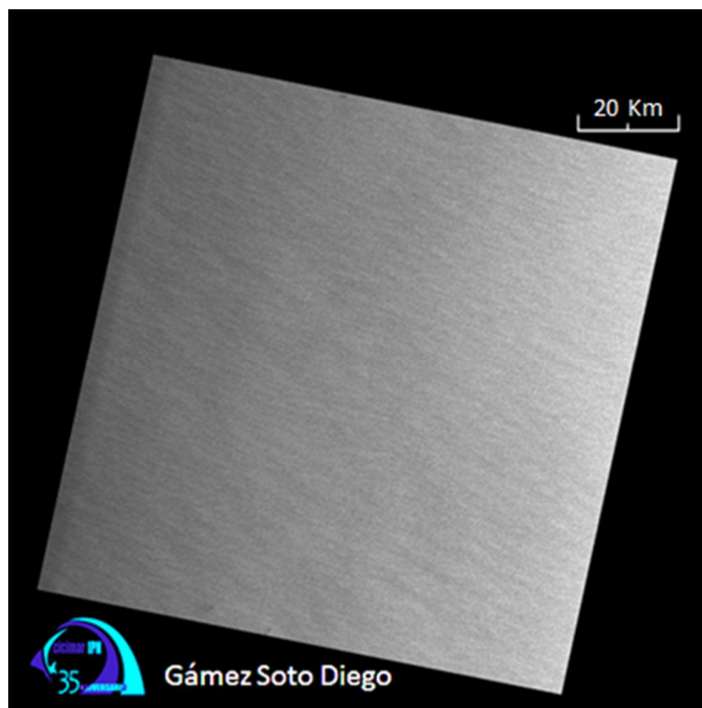
### 7.2 Imágenes del 28 de septiembre 1999.

La información del 28 de septiembre consta de 4 imágenes en paso descendente, las cuales se encuentran ubicadas frente a la Laguna de Términos sobre la plataforma continental, excepto una considerable parte de la imagen “d” (Fig. 4).

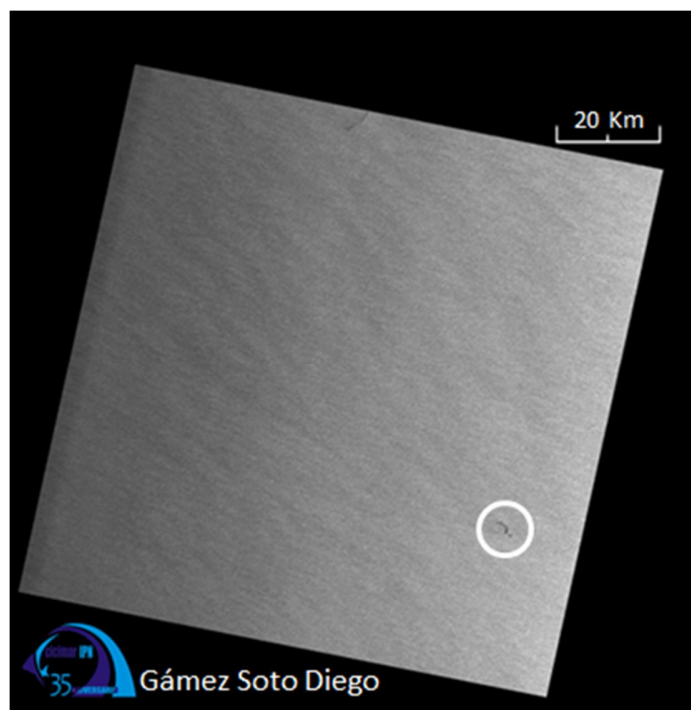


**Figura 4.** Imagen virtual donde se localiza el paso descendente del 28 de septiembre de 1999.

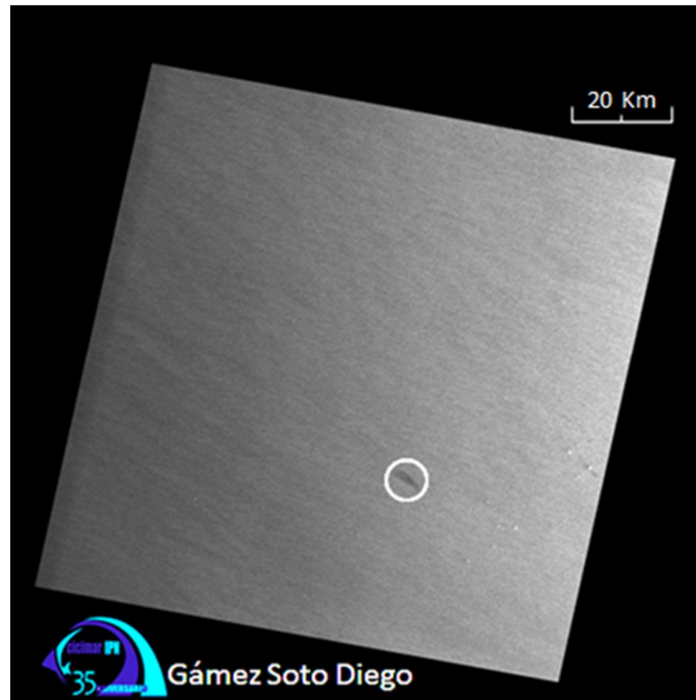
En esta serie de imágenes, sobresalen en las dos primeras (cuadros a y b) vórtices en rollo (VR) representados por las líneas u ondulaciones inclinadas, con una longitud de onda aproximada de 7.8 km (Figs. 5 y 6). En los cuadros b y c (Figs. 6 y 7) son visibles dos manchas de hidrocarburos de aproximadamente 2.4 km y 4.8 km (círculos), respectivamente. Por su ubicación (alejadas de la zona petrolera), se asume que estas manchas, se deben a causas naturales (Chapopoterías “CH”).



**Figura 5.** Imagen 01O232122893177 del 28 de septiembre (cuadro a). Vórtices en rollo (VR).

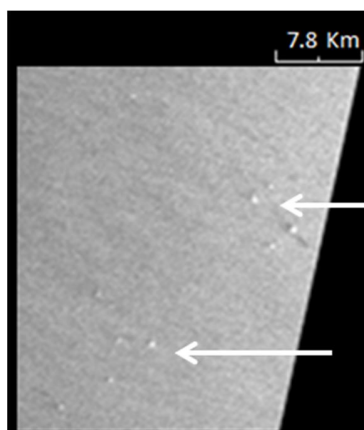


**Figura 6.** Imagen 02O232122893195 del 28 de septiembre (cuadro b). Vórtices en Rollo (VR). Chapopotera de 2.4 km (círculo).



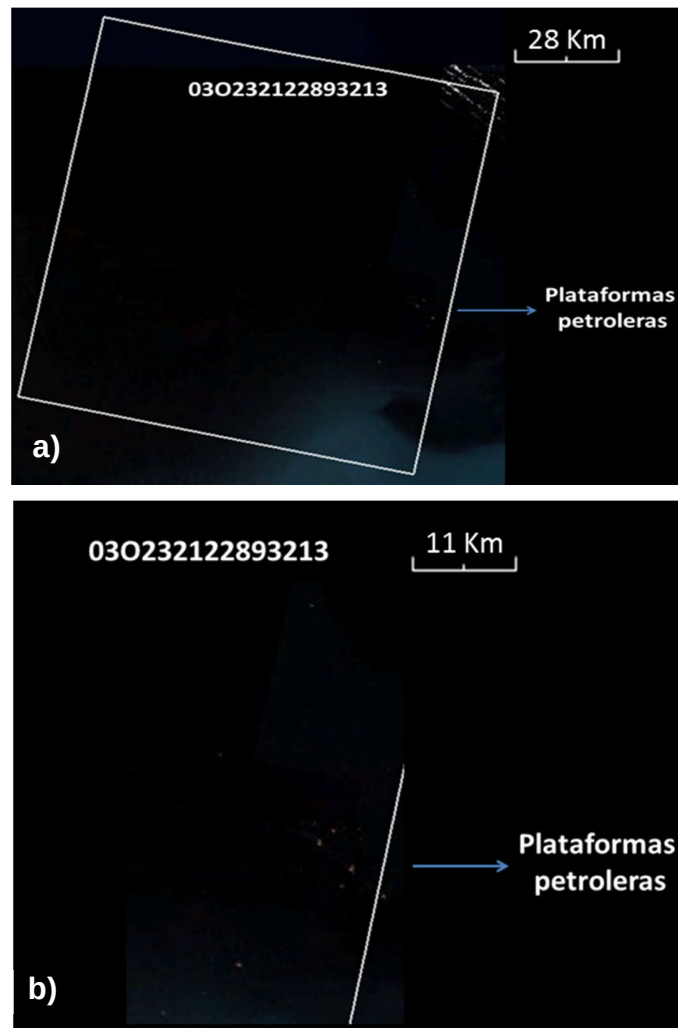
**Figura 7.** Imagen 03O232122893213 del 28 de septiembre (cuadro c). Vórtices en Rollo. Chapopotera de 4.8 km (círculo). Puntos brillantes.

Los puntos con altos valores de retrodispersión (brillantes), son algunas de las plataformas petroleras de la Sonda de Campeche (poseen una dimensión de 100 a 800 metros), alrededor de las cuales se puede destacar una escasa presencia de contaminación superficial por hidrocarburos (Fig. 8).



**Figura 8.** Subimagen de la imagen 03O232122893213. Algunas plataformas petroleras de la Sonda de Campeche.

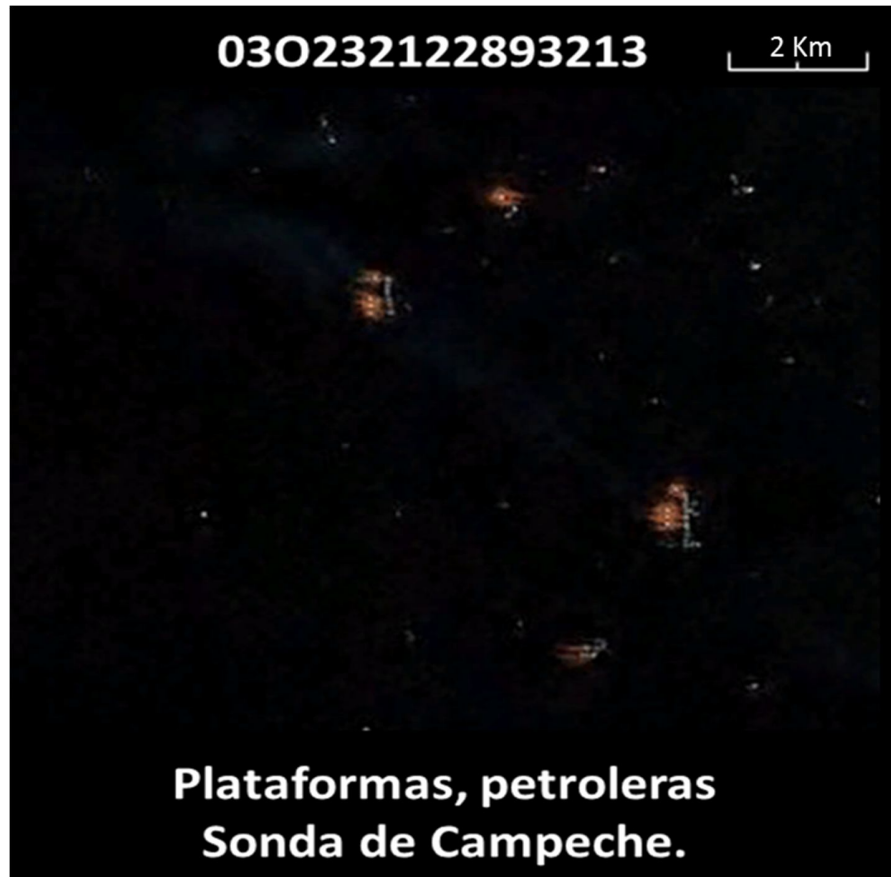
Para el óptimo posicionamiento de las plataformas petroleras, se usó un MVN (Mapa Virtual Nest) de la imagen 03O232122893213 (cuadro c), y se constató que los puntos brillantes correspondían a las plataformas petroleras. Se realizaron dos imágenes virtuales previas y al final se registran dichas plataformas (Fig. 9).



**Figura 9.** Imágenes virtuales de la imagen 03O232122893213. a) Georeferenciación del cuadro en el MVN. b) Detección de plataformas petroleras en el MVN.

En la imagen virtual siguiente (Fig. 10), se exhiben de una manera más evidente las plataformas de la Sonda de Campeche, esto comprueba el análisis

previo, es decir, la detección de las plataformas petroleras, representadas en la imagen SAR, como puntos brillantes.



**Figura 10.** Imagen virtual de la imagen 03O232122893213. Sonda de Campeche visualizada en el MVN. Las zonas brillantes corresponden a las chimeneas de gas.

En la cuarta imagen (cuadro d) de este paso, la 04O232122893231 (Fig. 11), se puede observar la superficie del mar y gran parte de la costa. En la zona costera se pueden observar diferentes estructuras como los frentes de pluma de río, de los ríos Gonzalez y Grijalva. Éstos poseen una forma de “U” inclinada hacia el oeste debido a la corriente costera permanente (CCP), presente en las costas del Golfo de México. Además, se detecta la presencia de líneas cuasi perpendiculares a la costa aparentemente asociadas a la corriente litoral (CL o CCP). Lo anterior se tratará con mayor detalle en imágenes subsecuentes.



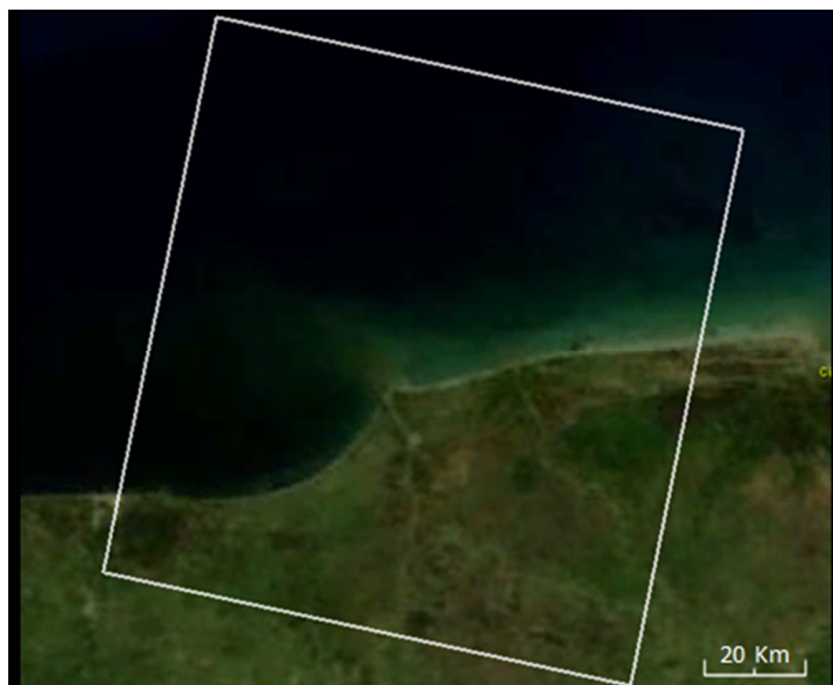
**Figura 11.** Imagen 04O232122893231 del 28 de septiembre (cuadro d). VR de menor longitud. Desembocaduras de los ríos Gonzalez (A), Grijalva (B) y San Pedro y San Pablo (C).

Posteriormente el cuadro correspondiente a esta imagen fue georeferenciado en un MVN (Fig. 12). En esta imagen del visible se puede observar, a pesar de que no son del mismo periodo que las imágenes SAR, una importante dispersión de sedimentos, incluso hasta 60 km de la costa.

En la imagen virtual 04O232122893231 (Fig. 13), con el cuadro de la imagen SAR georeferenciado, se puede observar un transporte litoral de sedimentos de forma muy significativa, proveniente al parecer de la zona de la Laguna de Términos hasta el río Grijalva, donde posteriormente se dispersan estos sedimentos hacia mar abierto.



**Figura 12.** Imagen virtual 04O232122893231. Georeferenciación del cuadro “d” en el MVN, donde se observa una importante dispersión de sedimentos.



**Figura 13.** Imagen virtual 04O232122893231. Georeferenciación del cuadro en el MVN, se observa un transporte litoral de sedimentos de forma muy significativa.



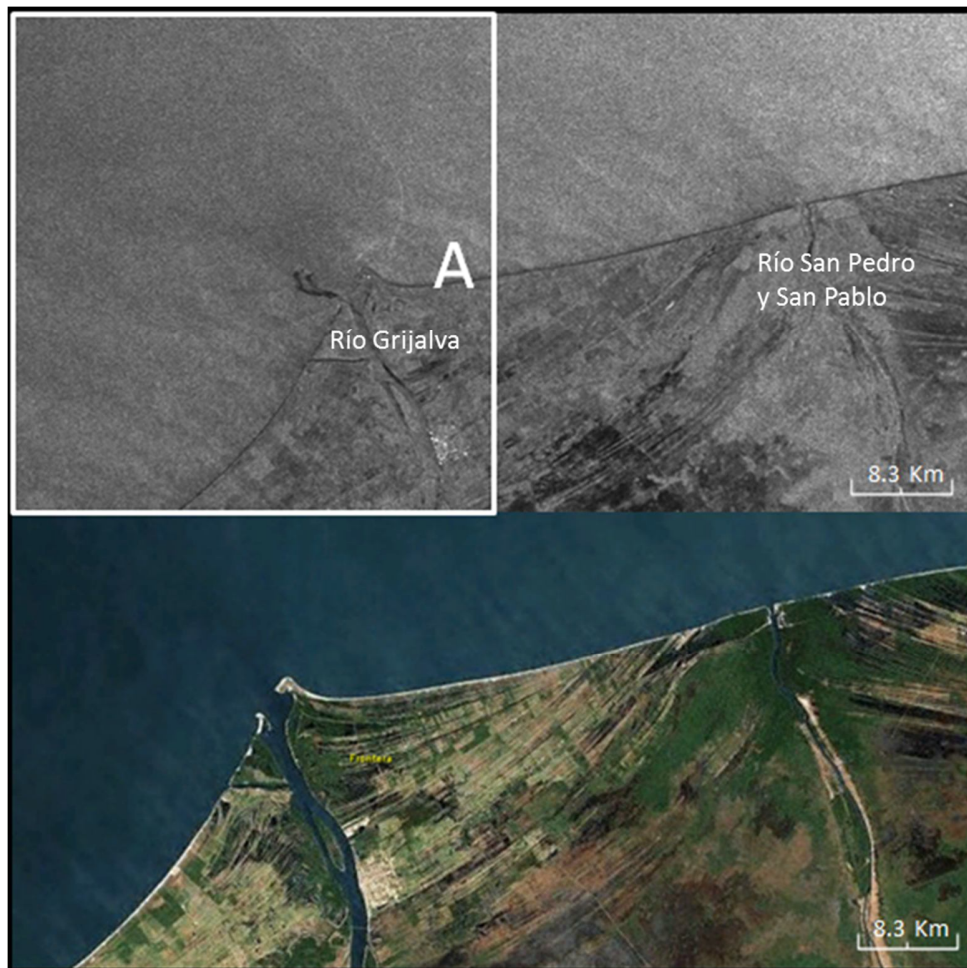
En la subimagen de la imagen 04O232122893231 (Fig. 14), se puede observar una comparación, entre el MVN y la imagen SAR, que presentan gran similitud. Se observan con detalle en la imagen SAR, los frentes formados por las desembocaduras de los ríos Gonzalez, Grijalva, San Pedro y San Pablo (de izquierda a derecha), en forma de “U” inclinadas hacia el oeste, con altos niveles de retrodispersión principalmente en su lado este más que del oeste y ligeramente menores en su interior. Así mismo, se nota un incremento de retrodispersión al este del frente generado por la descarga del río Grijalva, posiblemente relacionado al sedimento en suspensión. También destaca con mayor detalle las estructuras (líneas) cuasi perpendiculares a la costa.



**Figura 14.** Subimagen de la imagen 04O232122893231. Comparación imagen SAR y MVN. Desembocaduras de los ríos Gonzalez, Grijalva y San Pedro y San Pablo.



El borde más notorio del frente del río Grijalva (este), es de aproximadamente 15.3 km y se continúa observando en su interior valores ligeramente menores de retrodispersión (rectángulo A), situación que también ocurre en la desembocadura del río San Pedro y San Pablo. Así mismo, se detectan en su desembocadura, sustancias superficiales que amortiguan fuertemente las ondas capilares (ondas de 5 a 10 cm), las cuales podrían ser hidrocarburos. Se observan altos valores de retrodispersión en la zona costera, a la derecha del lado este del frente, asociados a la presencia de las líneas cuasi perpendiculares a la costa, aparentemente relacionados a la CCP a lo largo del año y al transporte de sedimento generado por este flujo (Fig. 15).



**Figura 15.** Subimagen de la imagen 04O232122893231. Comparación imagen SAR y MVN. Frentes de los ríos Grijalva y San Pedro y San Pablo (izquierda a derecha).

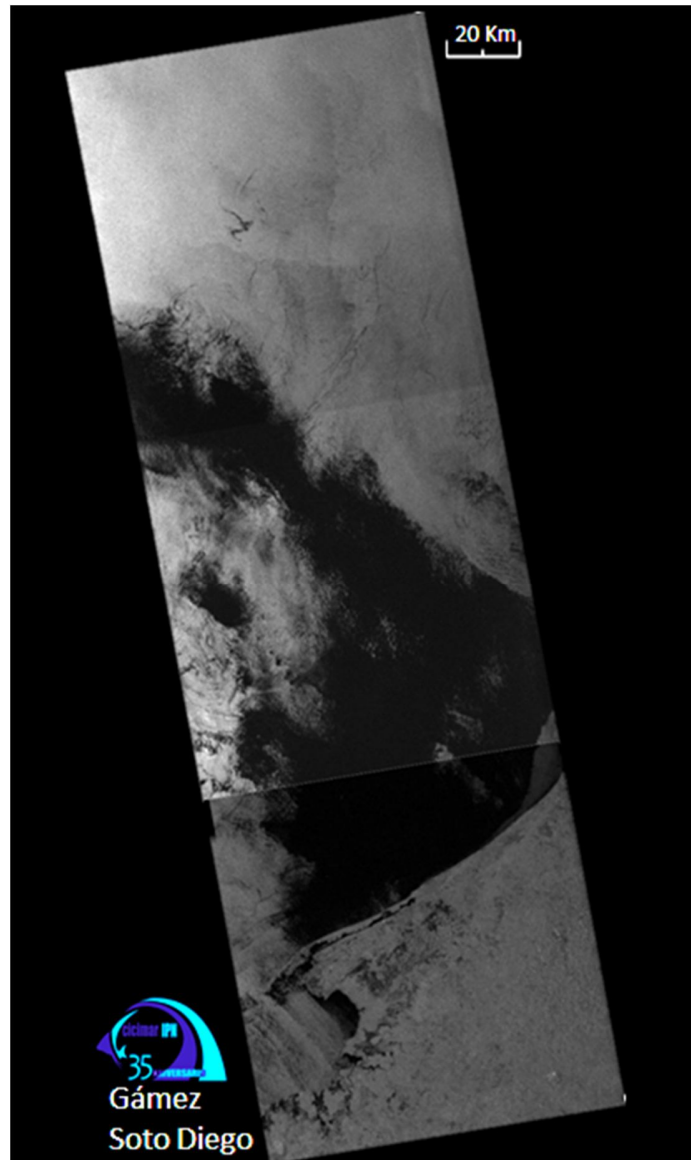
### 7.3 Imágenes del 7 de octubre 1999.

Para esta fecha se analizó el paso ascendente conformado por tres imágenes, las cuales se muestran en el MVN (Fig. 16).



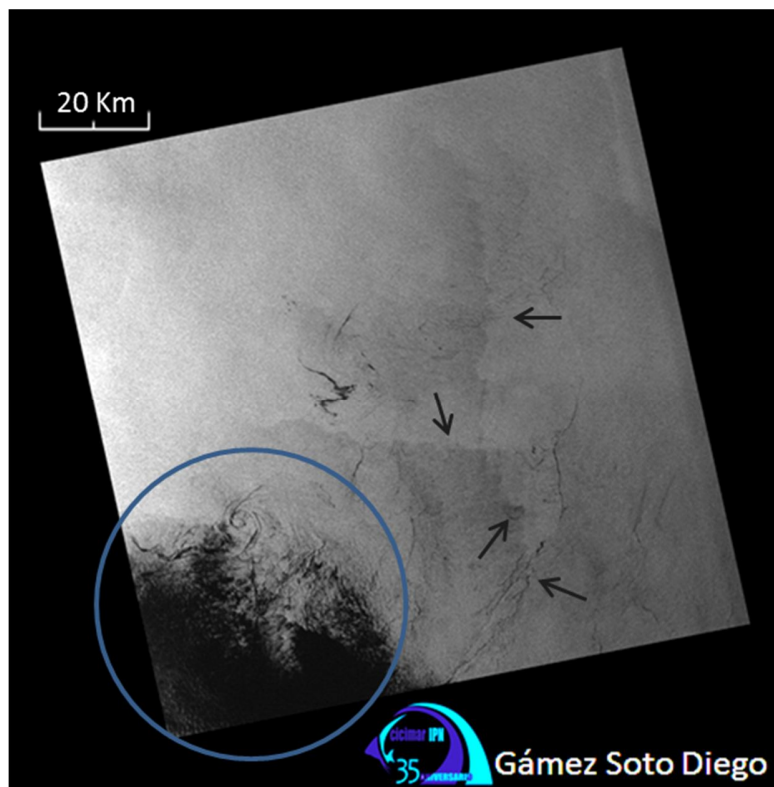
**Figura 16.** Imagen virtual donde se localiza el paso ascendente del 7 octubre de 1999.

En este conjunto de imágenes (Fig. 17), se observa la presencia de diferentes fenómenos. En él destacan, en primera instancia, procesos atmosféricos como un amplio frente de vientos, que divide la imagen en dos regiones, una zona con altos valores de retrodispersión y otra con valores muy bajos de esta característica (valores de retrodispersión). Dicho fenómeno es transversal al paso y posee una longitud aproximada de 120 km, registrándose algunos remolinos asociados a este fenómeno. Así mismo, se detectan tres firmas frontales en la imagen 07O233347100405 (cuadro e). Toda esta fenomenología será abordada en las siguientes imágenes que conforman este paso.



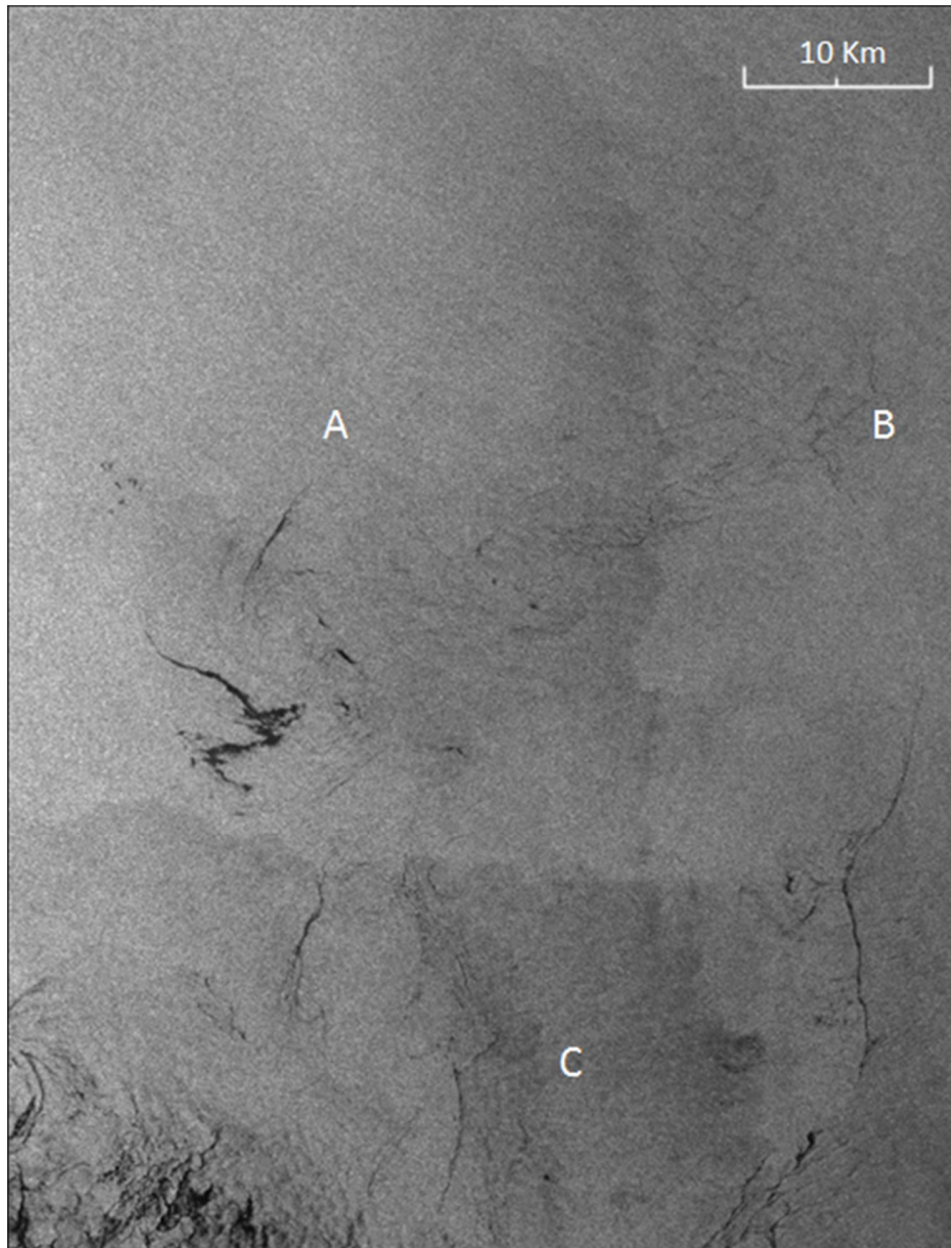
**Figura 17.** Mosaico 1. Imágenes del 7 de octubre 1999 paso ascendente.

En la imagen 07O233347100405 (cuadro e), se detectaron tres estructuras que presentan la firma de frentes, las cuales posiblemente son oceánicos por su firma de retrodispersión (Fig. 18). También sobresalen líneas de baja retrodispersión causadas posiblemente por la presencia de la CCP, la cual permanece todo el año y un remolino ciclónico donde se presentó una mancha de petróleo. Además, en la parte inferior izquierda de la imagen, es visible una porción de la zona frontal de vientos con un remolino ciclónico involucrado.



**Figura 18.** Imagen SAR 07O233347100405 del 7 de octubre (cuadro e). Fenomenología oceánica y atmosférica.

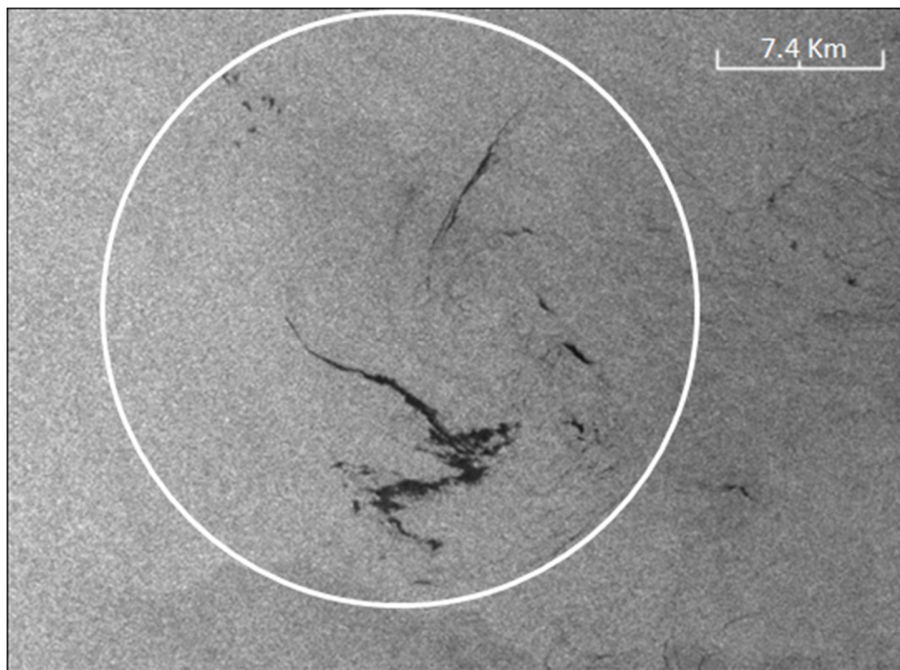
La subimagen de la figura 19, muestra las tres firmas de retrodispersión que no pudieron ser identificados como frentes oceánicos o atmosféricos, detectadas como líneas onduladas. Estos frentes convergen en un mismo punto (parte inferior de la imagen derecha) y separan en tres zonas ésta subimagen (A, B y C), con diferentes valores de retrodispersión. La zona A (39x30 km), presenta valores relativamente altos y bajos de retrodispersión, sin embargo, se pueden observar un remolino ciclónico (RC) perturbando un derrame de petróleo. La zona B (40x20 km), registra valores relativamente mayores de retrodispersión, observándose una parte de la trayectoria del remolino registrado en la zona A, a través de líneas oscuras de baja retrodispersión (parte superior de la imagen), así como líneas también oscuras generadas muy posiblemente por la CCP. La Zona C (30x13 km), presenta los valores mínimos de retrodispersión de la subimagen y se puede observar una pequeña parte del frente de vientos registrado en este paso.



**Figura 19.** Subimagen de la imagen 07O233347100405. Firmas frontales de forma ondulatoria dividiendo tres zonas A, B y C, con diferente valor de retrodispersión.

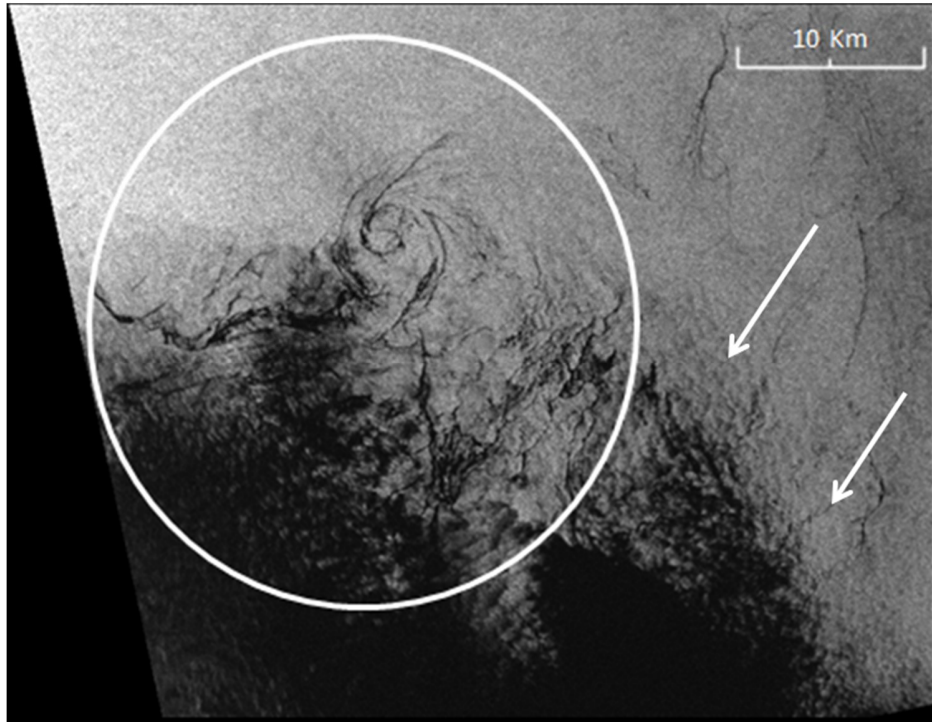


En la subimagen de la imagen 07O233347100405 (Fig. 20), se presenta el RC antes mencionado, observándose su estela de desplazamiento a través de líneas de baja retrodispersión y valores ligeramente menores en el interior de la estela. La perturbación de este remolino sobre el derrame de petróleo, cuya extensión es de 20 km aproximadamente, se observa más evidentemente en esta subimagen.



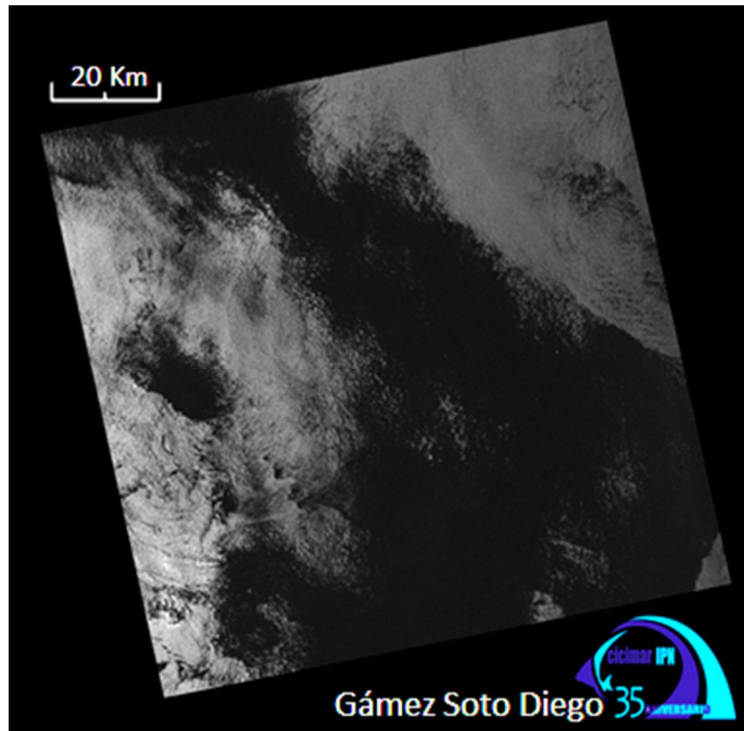
**Figura 20.** Subimagen 07O233347100405. Remolino ciclónico (RC) perturbando un derrame de petróleo de 20 km.

A su vez, en la imagen 07O233347100405 (Fig. 21), se detectó un giro atmosférico ciclónico cuya dimensión aproximada es de 13 km. También es visible el extremo norte de la zona frontal de vientos, alrededor de la cual se observan estructuras reportadas previamente como celdas convectivas atmosféricas (CCA). Las cuales por lo general, producen una firma en forma de manchas en las imágenes SAR, las cuales se caracterizan por presentar zonas más brillantes y oscuras que la señal de su entorno, con una distancia entre ellas de 2 a 8 km.



**Figura 21.** Subimagen 07O233347100405. Giro atmosférico ciclónico de 13 km (círculo). Celdas convectivas atmosféricas alrededor del frente de vientos (flechas).

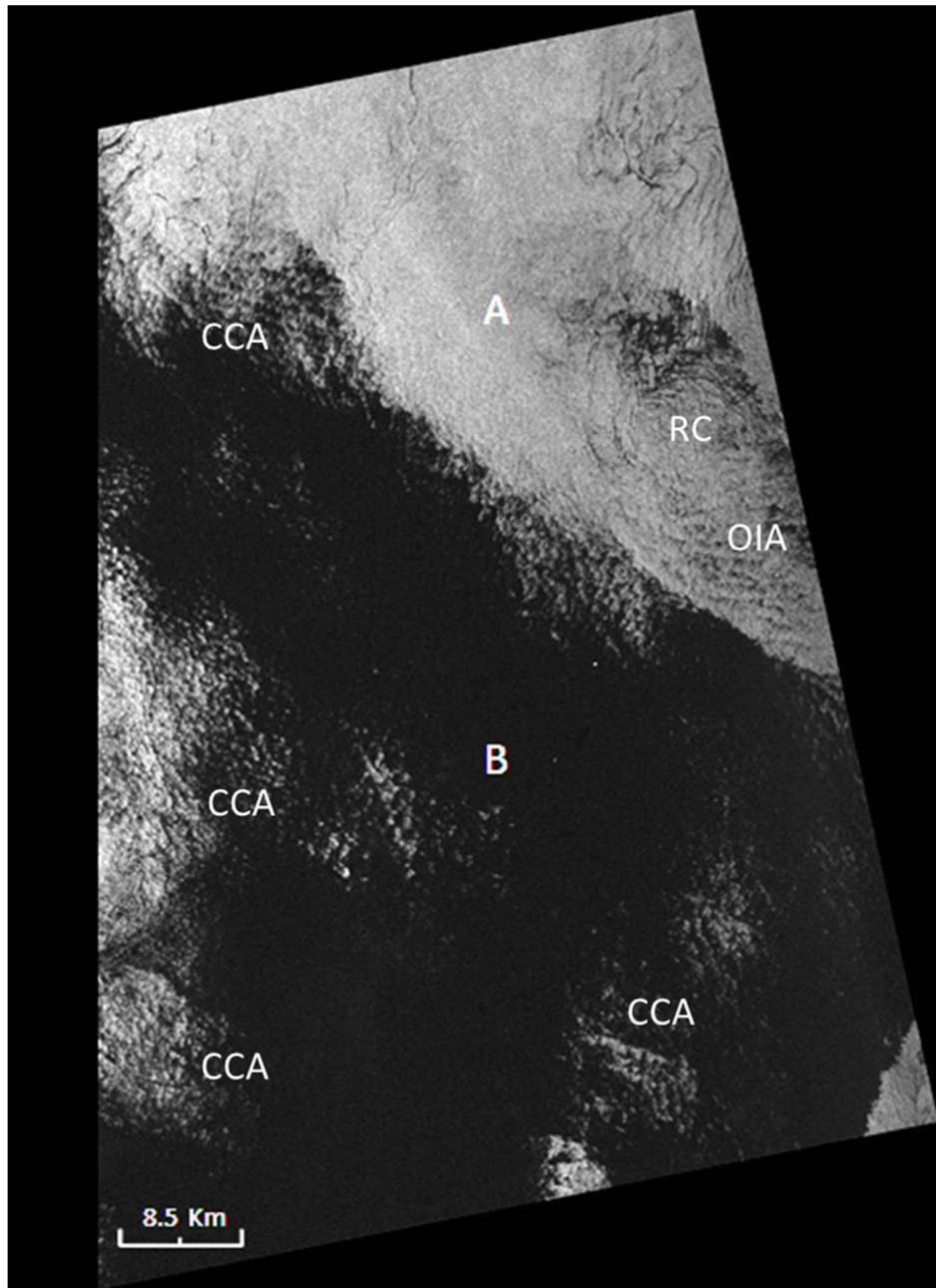
En la imagen 06O233347100387 (cuadro f), se observa la parte central del frente de vientos dividiendo a dos zonas con valores muy diferentes de retrodispersión (Fig. 22). En estas se observan algunos fenómenos atmosféricos, los cuales serán analizados por separado mediante subimágenes.



**Figura 22.** Imagen 06O233347100387 del 7 de octubre (cuadro f). Zona central del frente de vientos. Estructuras que poseen líneas oscuras o de baja retrodispersión.

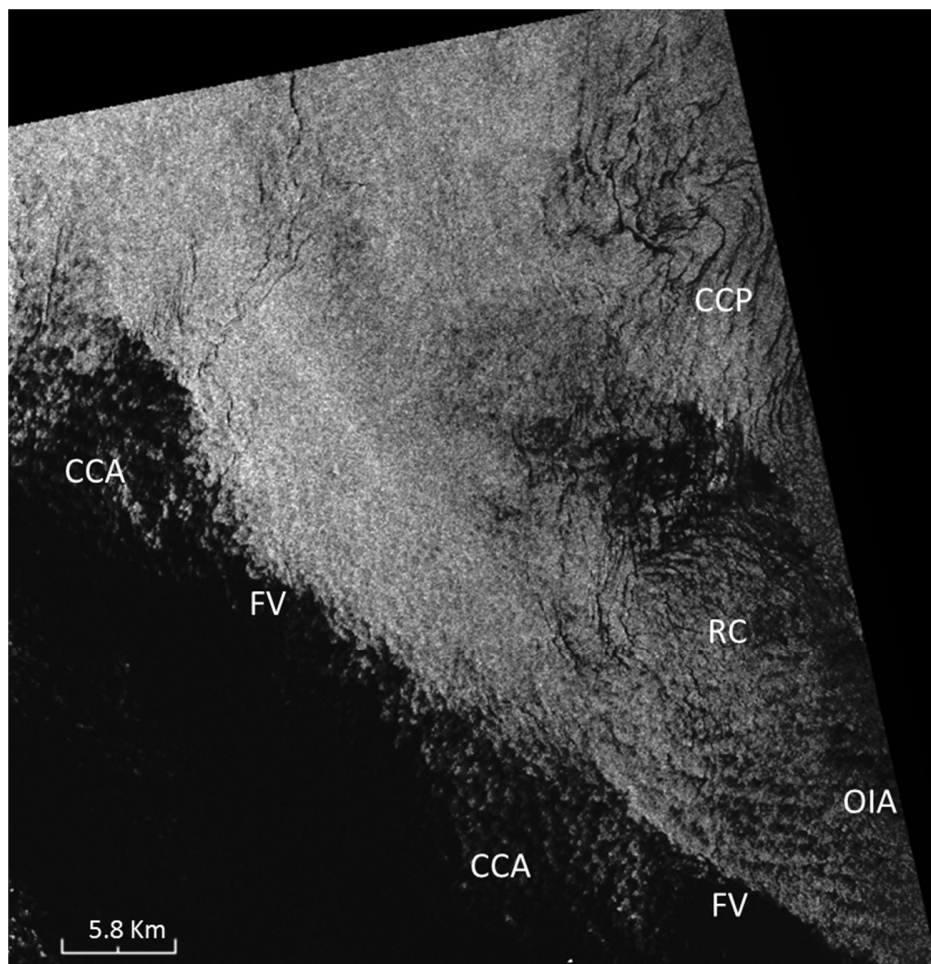
En la primer subimagen de la parte superior de la imagen 06O233347100387 (Fig. 23), se muestran líneas oscuras (parte superior derecha de la imagen), las cuales están relacionadas con la CCP (zona A). Estas líneas oscuras al parecer se integran posteriormente a con un remolino ciclónico (RC) el cual no es posible identificarlo como marino o atmosférico. En la parte sur de la zona de este vórtice se observan estructuras relacionadas con ondas internas atmosféricas (OIA). En la zona con valores de muy bajos de retrodispersión (zona B), se aprecian CCA con longitudes de 4 a 10 km, en la zona frontal central del frente de vientos, la cual en la parte inferior posee una mayor dimensión, con respecto a la parte superior.





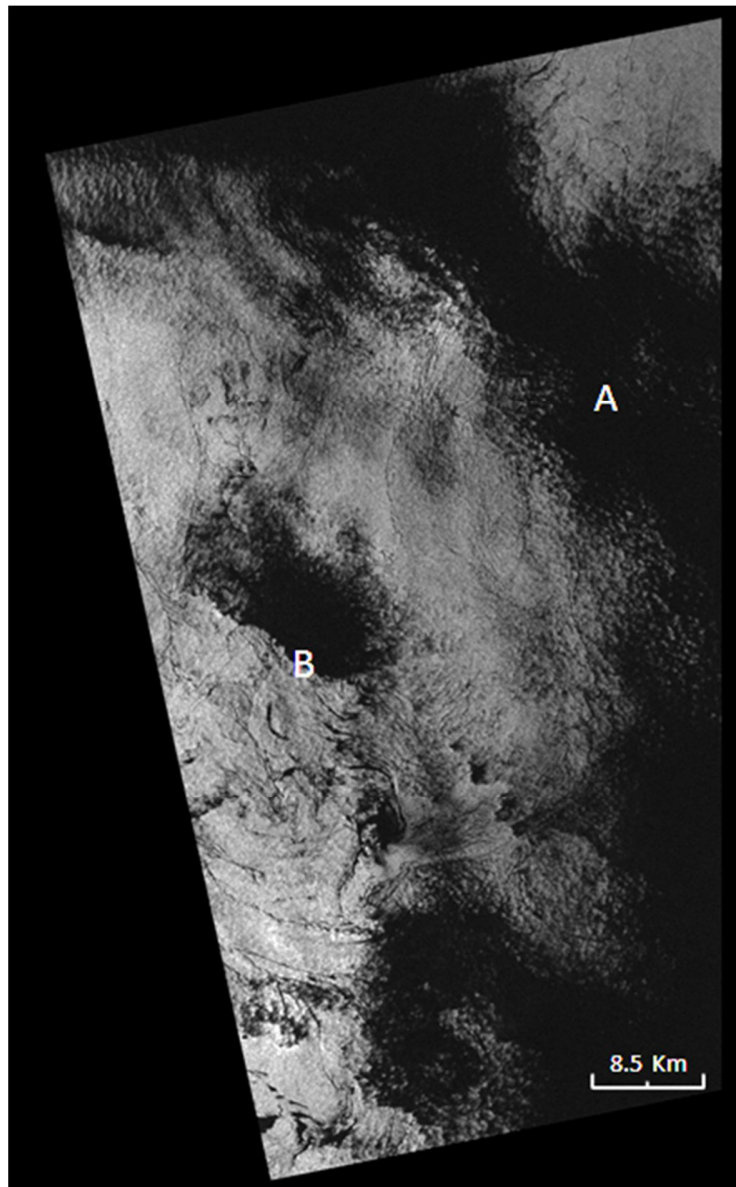
**Figura 23.** Primera subimagen de la imagen 06O233347100387, zona central del frente de vientos. Zona A estructuras influenciadas por la presencia de la corriente costera permanente (CCP), remolino ciclónico (RC) y tren de ondas internas atmosféricas (OIA). Zona B de muy baja retrodispersión (zona oscura) con celdas convectivas atmosféricas (CCA).

En esta segunda subimagen de la imagen 06O233347100387 (Fig. 24), se pueden observar con mayor detalle los fenómenos descritos anteriormente. La firma de la CCP, en la parte superior de la imagen, a través de líneas oscuras y el remolino descrito con anterioridad (RC) en la subimagen 06O233347100387, así mismo con líneas oscuras. En este remolino y al sur de él, se observa también el tren de ondas internas atmosféricas (IOA), mediante líneas paralelas de altos y bajos valores de retrodispersión. Otras estructuras son el frente de vientos (FV) y las celdas convectivas atmosféricas (CCA).



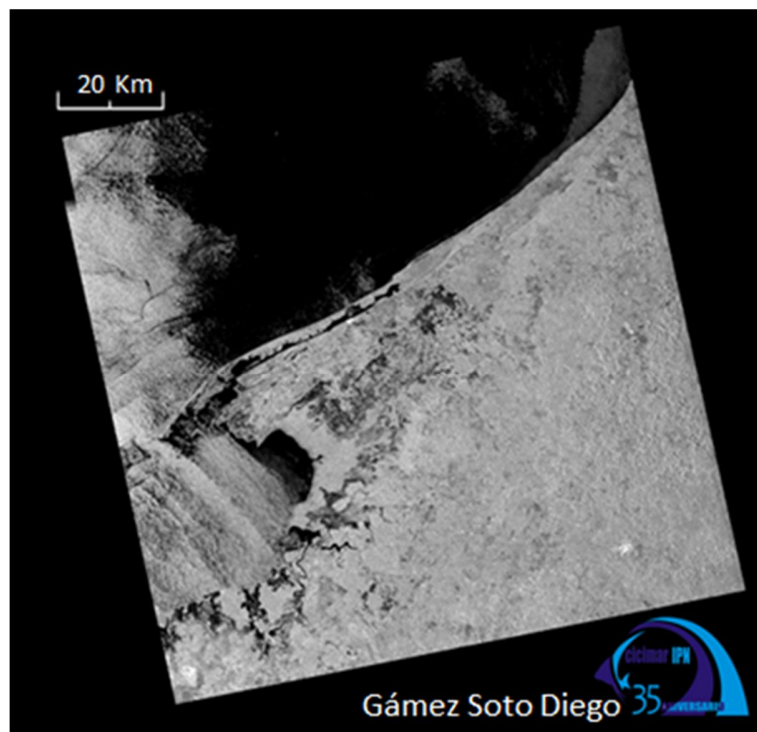
**Figura 24.** Segunda subimagen de la subimagen 06O233347100387, Corriente costera permanente (CCP), remolino ciclónico (RC), ondas Internas atmosféricas (OIA), celdas convectivas atmosféricas (CCA) y frente de vientos (FV).

En la tercera subimagen obtenida de la imagen 06O233347100387 (Fig. 25), se observan estructuras muy semejantes a las detectadas en la primer subimagen, como una amplia zona de muy baja retrodispersión asociada a la ausencia de vientos del lado oeste del frente (zona A), líneas oscuras relacionadas a la CCP y CCA.



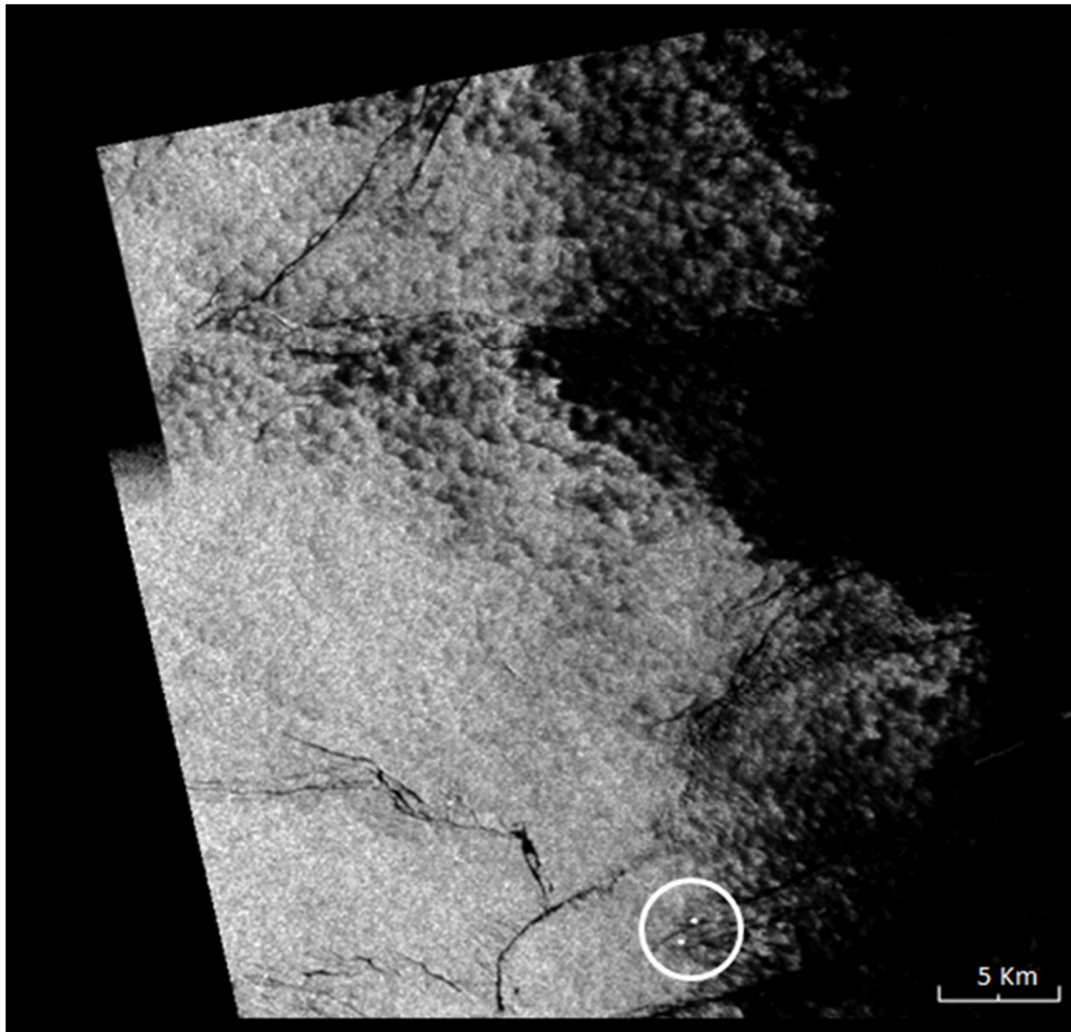
**Figura 25.** Tercera subimagen de la imagen 06O233347100387, zona oeste del frente de vientos. Líneas oscuras relacionadas con la CCP y CCA.

En la imagen 05O233347100369 (cuadro g), es visible la parte sur de la zona de vientos débiles del FV y la costa del estado de Campeche, donde se aprecia en la parte inferior izquierda, la zona este de la Laguna de Términos (Fig. 26). En la parte marina con altos valores de retrodispersión se puede observar líneas oscuras influenciadas por la CCP anteriormente mencionada y una estructura en forma de tren de ondas en el interior de la laguna. Otros fenómenos atmosféricos visibles como, CCA y VR (vórtices en rollo), serán analizados por separado en subimágenes.



**Figura 26.** Imagen 05O233347100369 del 7 de octubre (cuadro g). Parte sur de la zona del frente de vientos (FV), corriente costera permanente (CCP), celdas convectivas atmosféricas (CCA), vórtices en rollo (VR) y parte este de la Laguna de Términos.

En la primer subimagen de la imagen 05O233347100369 (Fig. 27), se detectaron CCA con longitudes de 2 a 10 km. Así mismo, se observan algunas líneas con bajos niveles de retrodispersión asociadas a la CCP y la amplia zona con ausencia de vientos. Por ultimo se detectaron dos embarcaciones representadas por puntos brillantes con alto nivel de retrodispersión (círculo).

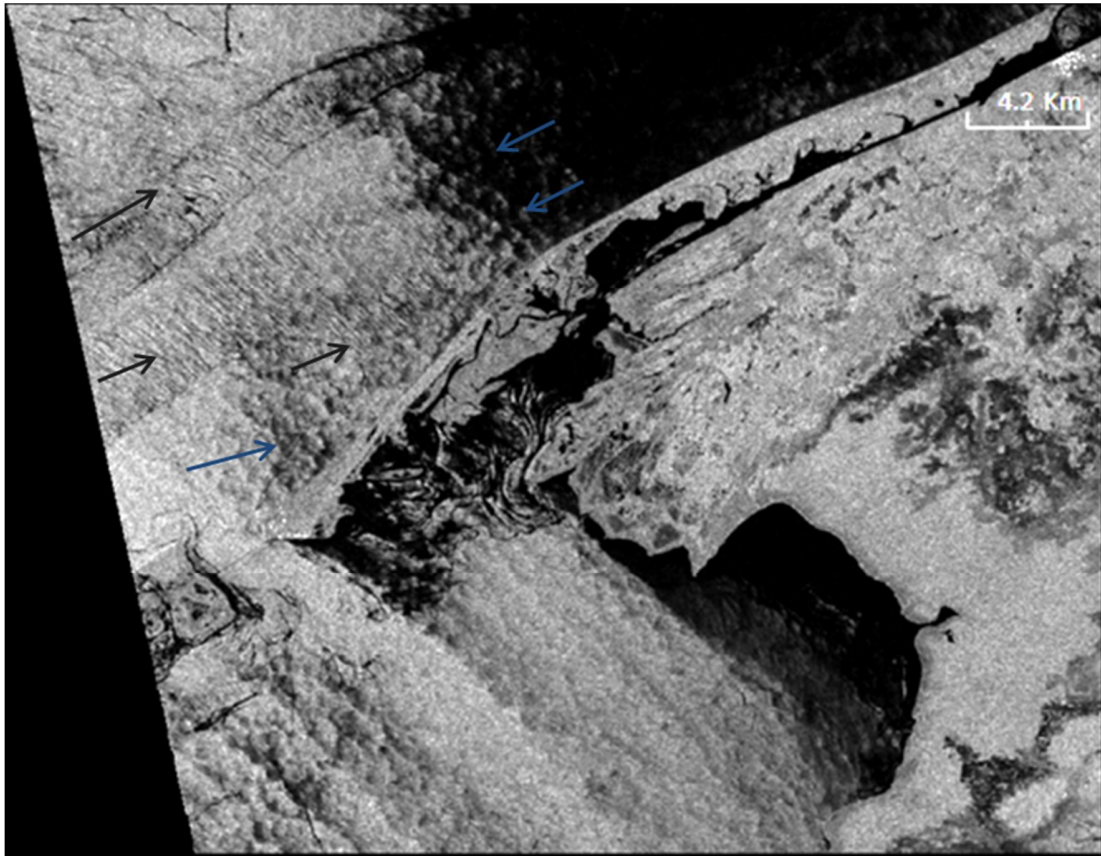


**Figura 27.** Primera subimagen de la imagen 05O233347100369. Celdas convectivas atmosféricas (CCA), líneas oscuras propias de la corriente costera permanente (CCP) y embarcaciones (puntos brillantes con alto nivel de retrodispersión, con una dimensión de 100 m c/u).

En la segunda subimagen de la imagen 05O233347100369 (Fig. 28), se observa una serie de líneas oscuras paralelas a la costa (lado oceánico) en la parte superior izquierda de la imagen, con longitudes aproximadas de 5 a 10 km. Estas líneas se superponen paralelamente a las líneas oscuras relacionadas a la CCP. Al este de estas series de líneas se detectan CCA, las cuales también se localizan en el borde de la zona de ausencia de vientos (zona oscura).



En la parte inferior izquierda se muestra la zona de la Laguna de Términos en la cual se observa un tren de ondas en la mayor parte de la laguna, así como líneas con niveles bajos de retrodispersión paralelas a la zona costera (flechas negras), también son visibles CCA (flechas azules).



**Figura 28.** Segunda subimagen de la imagen 05O233347100369. Líneas oscuras paralelas a la parte oceánica de la Laguna de Términos sobrepuestas a las líneas asociadas a la CCP, CCA y ondas dentro de la Laguna de Términos.

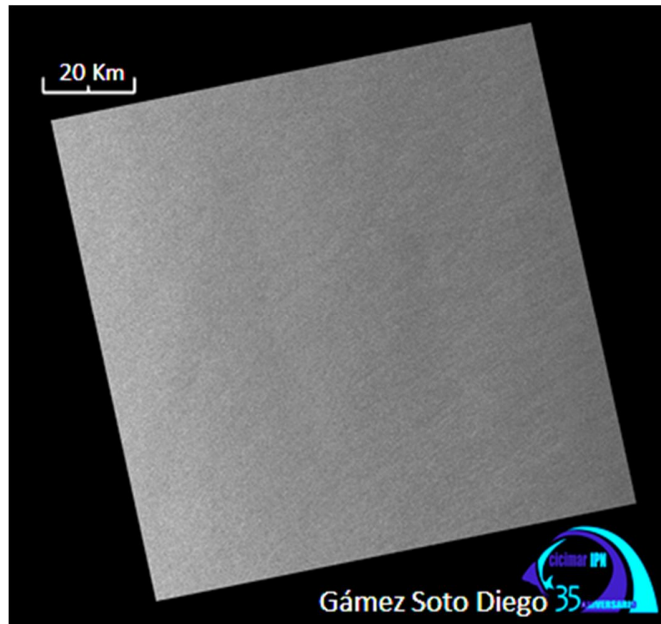
#### 7.4 Imágenes del 10 de octubre 1999.

Para esta fecha se analizó el paso ascendente conformado por tres imágenes, las cuales se muestran en el MVN (Fig. 29).

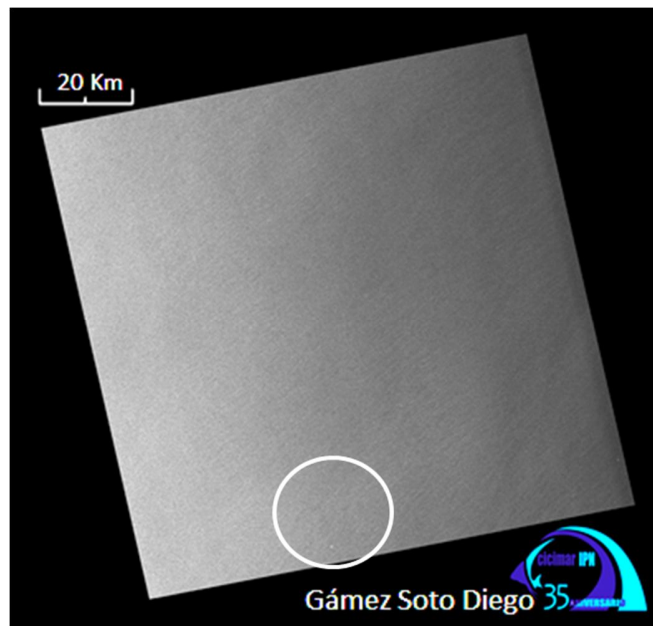


**Figura 29.** Imagen virtual donde se localiza el paso ascendente del 10 de octubre de 1999.

En esta serie de imágenes, se puede destacar en las dos primeras 10O233771010405 (cuadro h) y 09O233771010387 (cuadro i) la presencia generalizada de VR's, representados por las líneas inclinadas en la parte central e inferior derecha (Fig. 30 y 31). Estos son mayormente visibles conforme se acercan a la costa siendo aproximadamente de 2 km, la longitud entre ellos, y son apenas detectables en la imagen 10O233771010405, dada la corta distancia entre ellos menor de 1.5 km (Fig. 30). En la imagen 09O233771010387 (cuadro i), se observa en la esquina inferior derecha un grupo pequeño de puntos brillantes (Fig. 31).



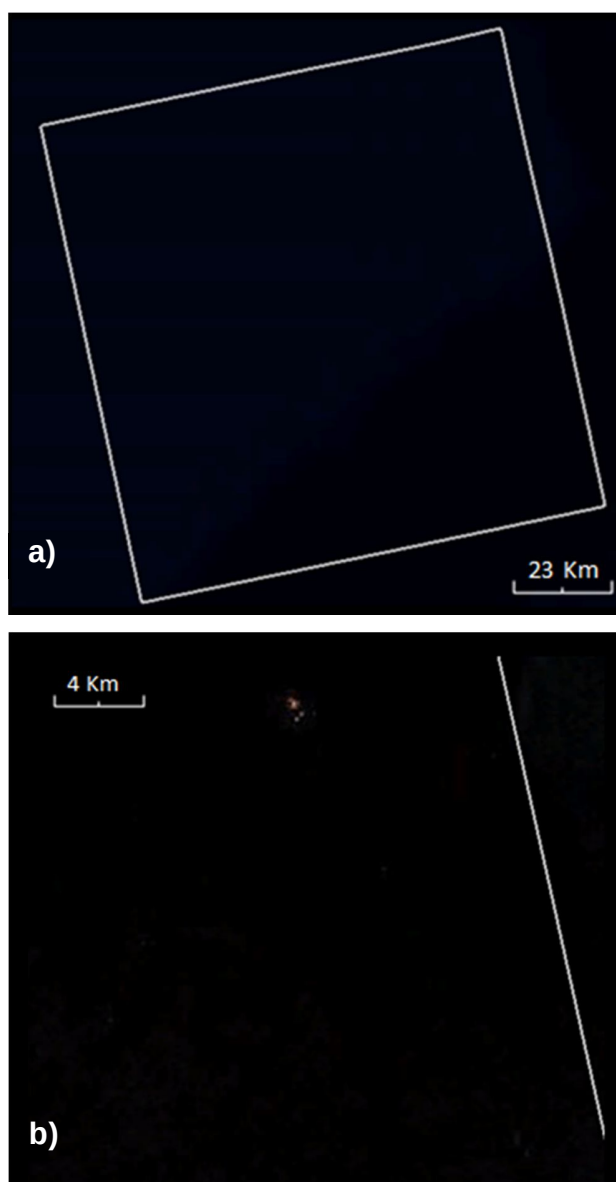
**Figura 30.** Imagen 10O233771010405 del 10 de octubre (cuadro h). Vórtices en Rollo (VR) en toda la imagen.



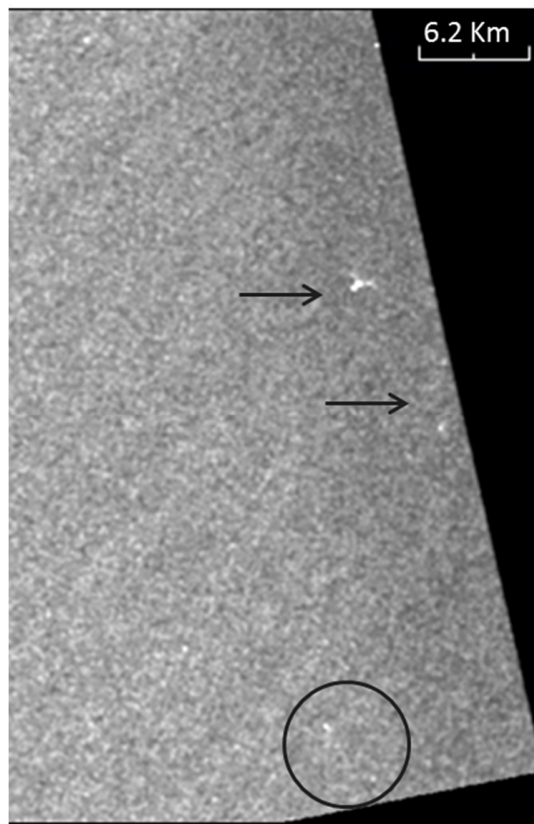
**Figura 31.** Imágenes 09O233771010387 del 10 de octubre (cuadro i). Vórtices en Rollo (VR) en toda la imagen. Dentro del círculo se observan dos barcos mediante puntos brillantes.



Estos fueron comparados con el MVN (Fig. 32), para confirmar la presencia de algunas plataformas de la Sonda de Campeche en la imagen SAR (Fig. 33). De ellas se destaca la ausencia de contaminantes por hidrocarburos. Destacan en la esquina inferior izquierda se detectaron dos barcos (dentro del círculo) representados por puntos brillantes, alrededor de los cuales no hay presencia de hidrocarburos (Fig. 33).

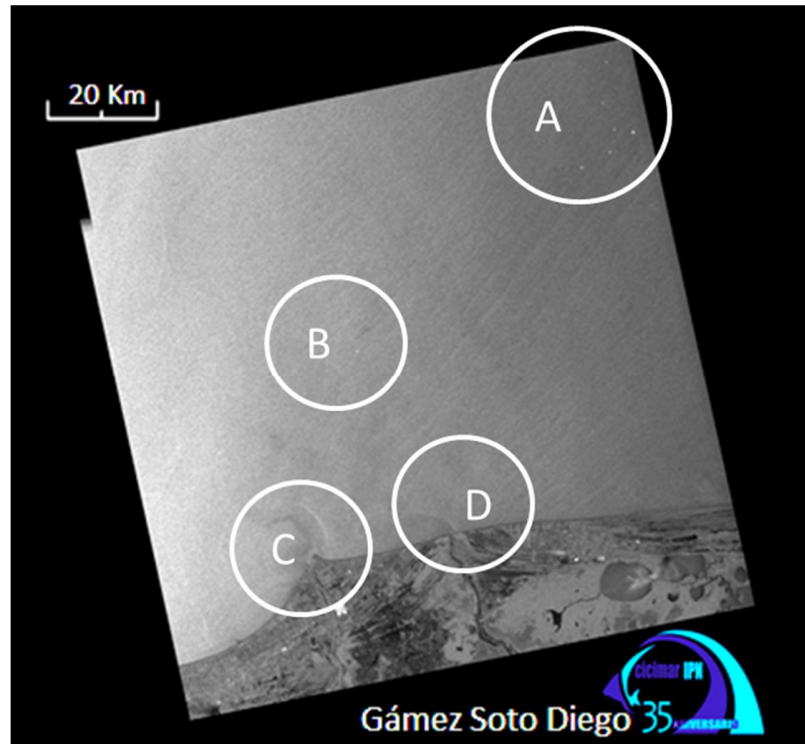


**Figura 32.** Imágenes virtuales de la imagen 09O233771010387. a) Cuadro georeferenciado en el MVN. b) Algunas plataformas de la Sonda de Campeche.



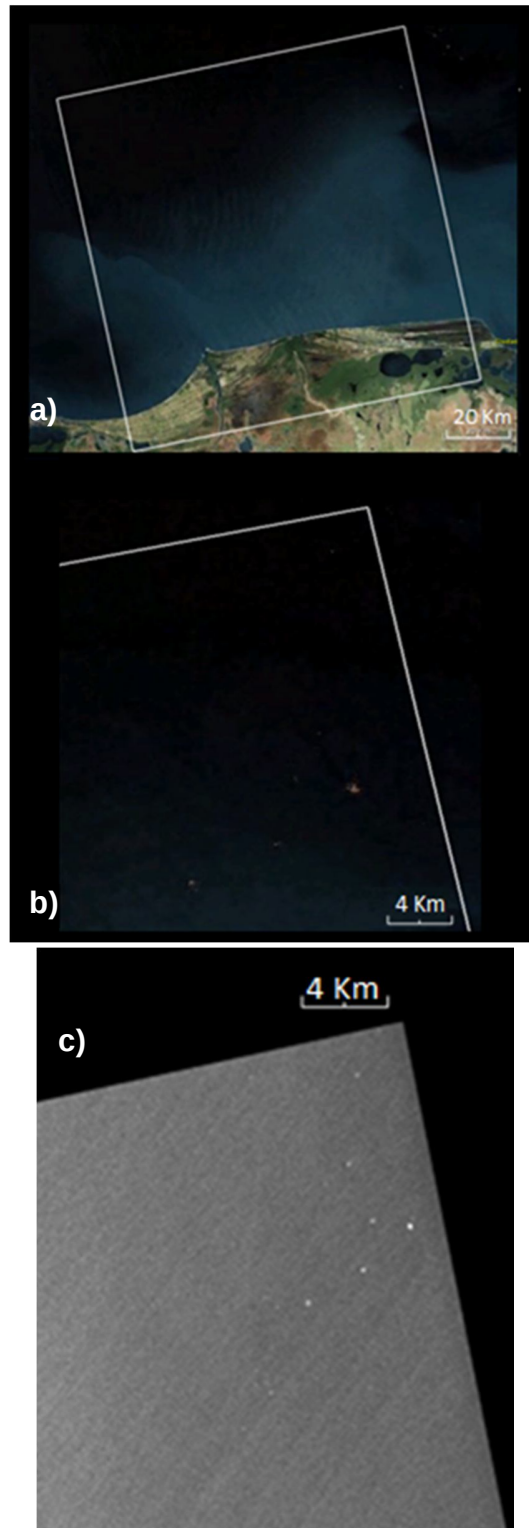
**Figura 33.** Subimagen 09O233771010387. Algunas plataformas de la Sonda de Campeche (flechas) y barcos (círculo), en la imagen SAR.

En la imagen 08O233771010369 (cuadro j), destacan en la parte superior derecha la presencia de plataformas petroleras representadas por puntos de alta retrodispersión (Fig. 34). El cuadro j fue comparado con el MVN para comprobar la posición de las plataformas petroleras detectadas en la imagen SAR. En la parte central de la imagen se detectaron dos filamentos de petróleo a través bajos valores de retrodispersión, uno de 2.7 km y otro de 1.7 km. A 2.2 km de estos filamentos se detectó un barco (punto brillante). También se detectaron dos frentes de pluma de río, causados por las descargas de los ríos Grijalva y San Pedro y San Pablo.

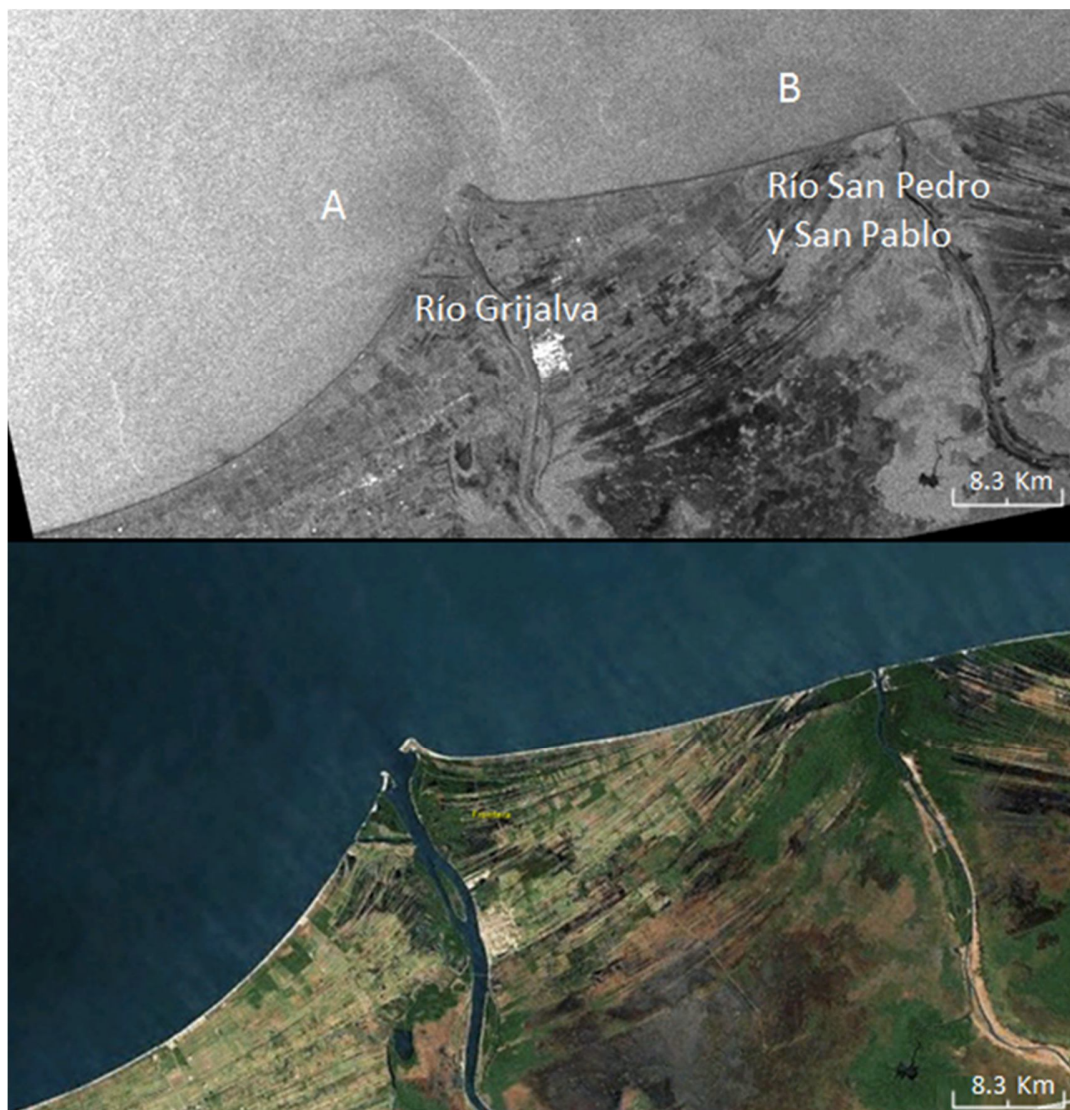


**Figura 34.** Imagen 08O233771010369 del 10 de octubre (cuadro j del paso). Áreas de interés (en círculos), plataformas petroleras (A), filamentos de petróleo y barco (B), frente del río Grijalva (C) y frente del río San Pedro y San Pablo (D).

En la figura 35 se observa el cuadro j georeferenciado, en la que se detecta un grupo de plataformas petroleras de la Sonda de Campeche, en la cual destaca la ausencia de contaminantes superficiales. En la siguiente subimagen (Fig. 36), se observa la desembocadura del Río Grijalva (zona A) donde se detectó un frente de aproximadamente 9 km, representado por la línea curva de alto retrodispersión. Por otra parte, en la desembocadura del Río San Pedro y San Pablo (zona B), es visible un frente de 2 km. Ambos frentes presentan una forma de U inclinadas hacia el oeste, con altos niveles de retrodispersión principalmente en su lado este que del oeste y ligeramente menores en su interior.



**Figura 35.** Imágenes virtuales de la imagen 08O233771010369. a) Georeferenciación del cuadro el MVN. b) Detección de un grupo de plataformas petroleras en el MVN. c) Detección de plataformas petroleras en la imagen SAR.



**Figura 36.** Subimagen de la imagen 08O233771010369. Comparación entre la imagen SAR y el MVN. Desembocaduras de los ríos Grijalva, San Pedro y San Pablo.

## 7.5 Imágenes del 13 de octubre 1999.

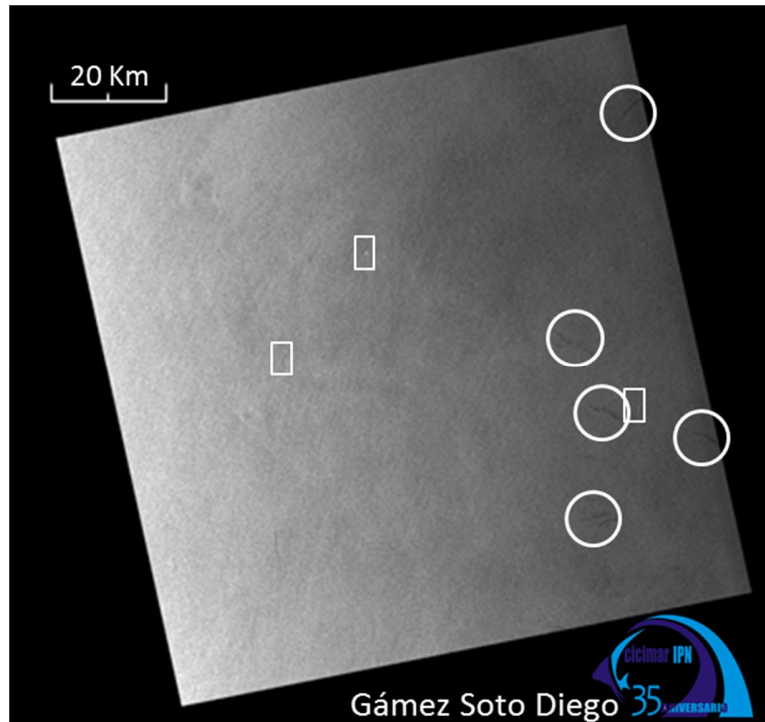
Para esta fecha se analizaron 4 imágenes en el paso ascendente (Fig. 37), en las cuales se detectaron embarcaciones, filamentos de petróleo, estructuras con bajos y altos valores de retrodispersión, un frente pluma de río en la desembocadura el Río Tonalá y trenes de ondas internas atmosféricas. Cada situación será mostrada conforme se analice cada imagen por separado.



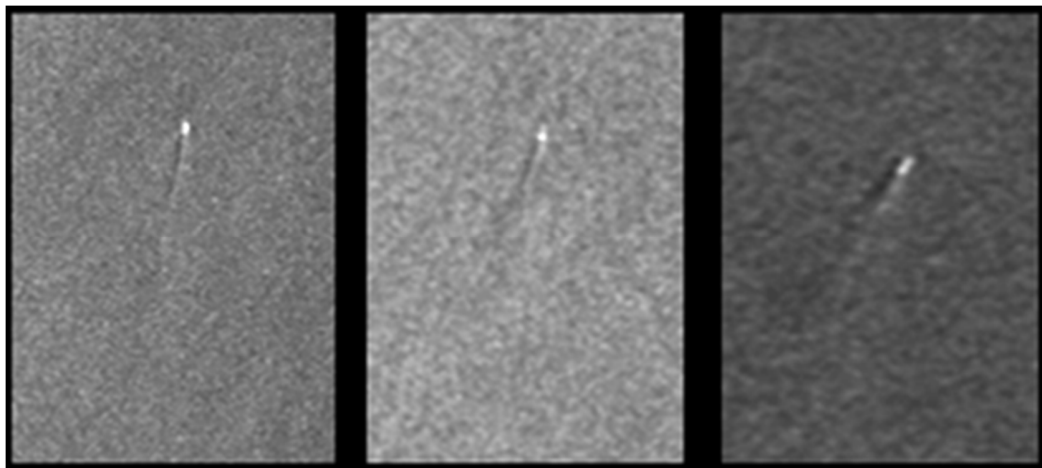
**Figura 37.** Imagen virtual donde se localiza el paso ascendente 13 de octubre.

En la imagen 14O234201310405 (cuadro k), se detectaron 6 filamentos de petróleo (círculos), que presentan líneas con bajos valores de retrodispersión. El primero de 5.9 km, el segundo de 8.4 km, el tercero de 6.1 km, el cuarto de 4.5 km y el quinto y sexto de 3.9 km y 2.3 km respectivamente. Es de destacar, que estos filamentos se encuentran en mar abierto y a profundidades que rebasan los 2000 m, pero muy cercanos a los barcos detectados. En partícula en esta imagen se tiene la presencia de tres barcos encerrados en los rectángulos (Fig. 38), los cuales se encuentran en movimiento. La detección de barcos en movimiento es posible realizarla ya que además de presentar puntos brillantes en la imagen SAR, éstos están seguidos por una estela (Fig. 39).



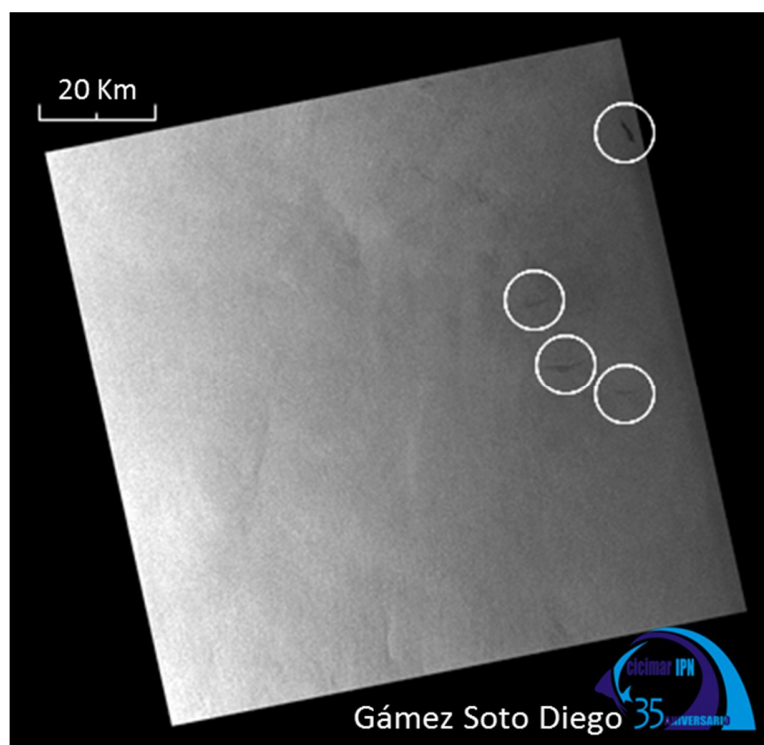


**Figura 38.** Imagen 14O234201310405 del 13 de octubre (cuadro k del paso). Detección de filamentos de petróleo (círculos) y barcos (rectángulos).



**Figura 39.** Subimagen de la imagen 14O234201310405. Detección de 3 barcos en movimiento y su estela (1.24 km, 1.14 km y 1.10 km respetivamente).

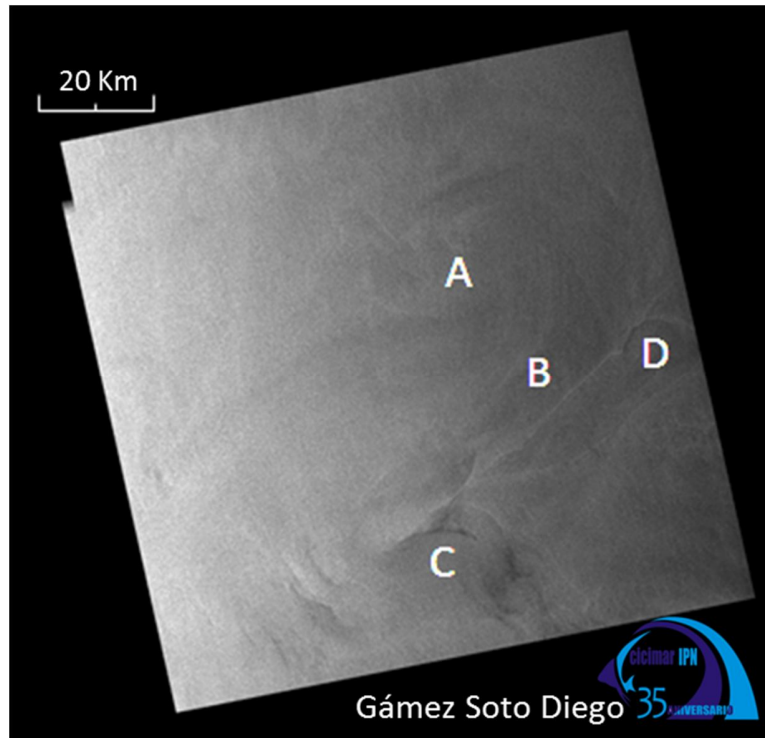
En la imagen 13O2342013100387 (Fig. 40), nuevamente se detectaron filamentos de petróleo sobresaliendo 4 de ellos por su dimensión (éstos están encerrados en los círculos): el primero es de 3.7 km, el segundo de 2.6 km, el tercero de 5.7 km y el cuarto de 2.4 km. Es de destacar que para este caso no se encuentran barcos cercanos a estos filamentos.



**Figura 40.** Imagen 13O2342013100387 del 13 de octubre (cuadro I del paso). Detección de filamentos de petróleo.

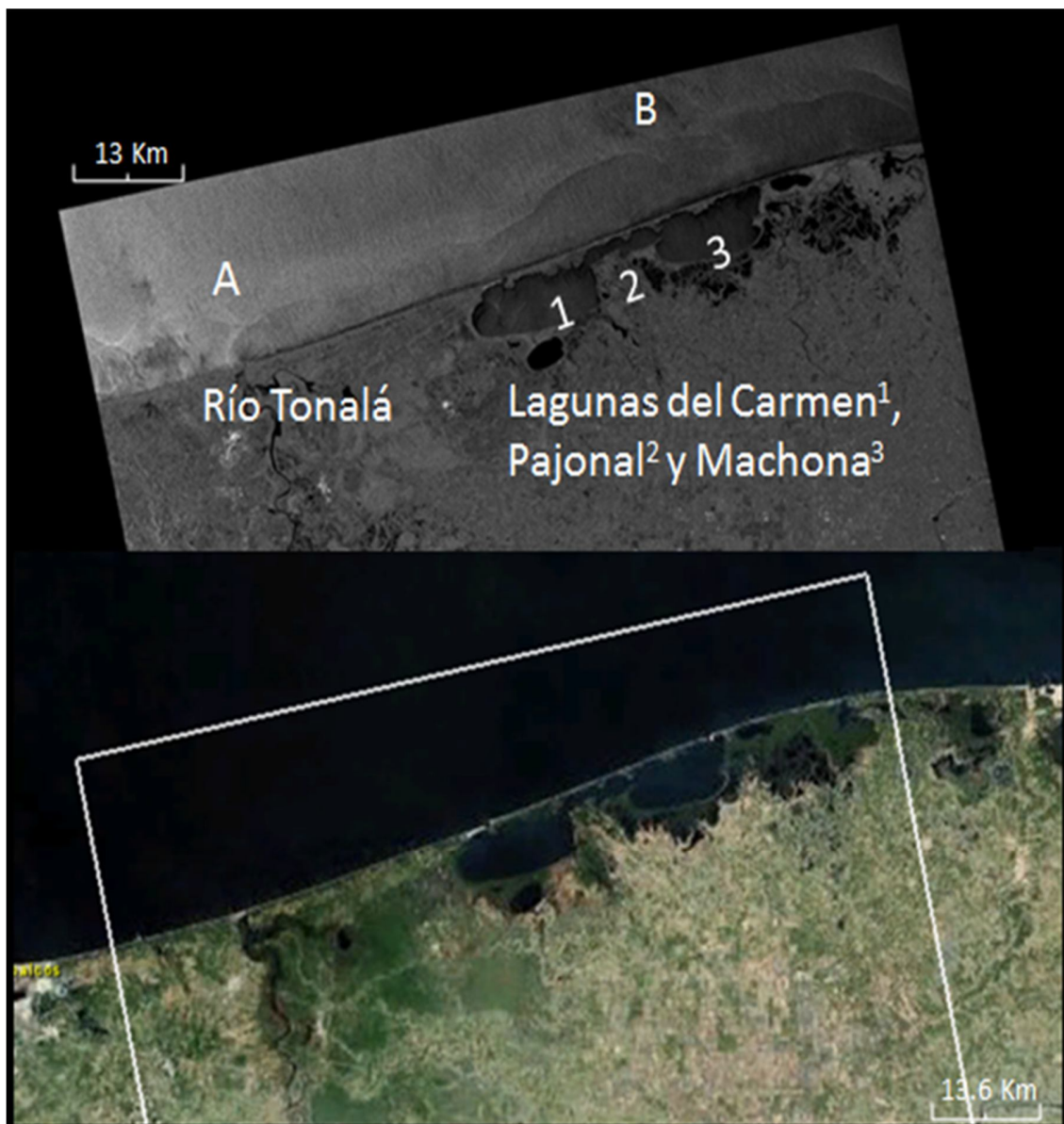
En la imagen 12O234201310369 (Fig. 41), sobresale un gran remolino ciclónico que ocupa la mayor parte de la imagen (zona A), el cual presenta en su porción sur una estructura de tipo frontal de 30 km de longitud (línea brillante B), que incluye dos pequeños remolinos en sus extremos (C y D).





**Figura 41.** Imagen 12O234201310369 del 13 de octubre (cuadro m del paso). Remolino ciclónico (A), zona frontal (B), remolinos asociados a la estructura frontal (C y D).

La imagen 11O234201310351 presenta una importante cobertura terrestre por lo que únicamente se muestra la desembocadura del Río Tonalá y las Lagunas del Carmen, Pajonal y Machona (Fig. 42) y su comparación con el MVN. En ella se puede observar un frente costero en forma de línea ondulada con altos y bajos valores de retrodispersión, que abarca desde el Río Tonalá hasta la parte este de las lagunas. Así mismo, en esta imagen también se observan las líneas casi paralelas a la costa reportadas en otros pasos.



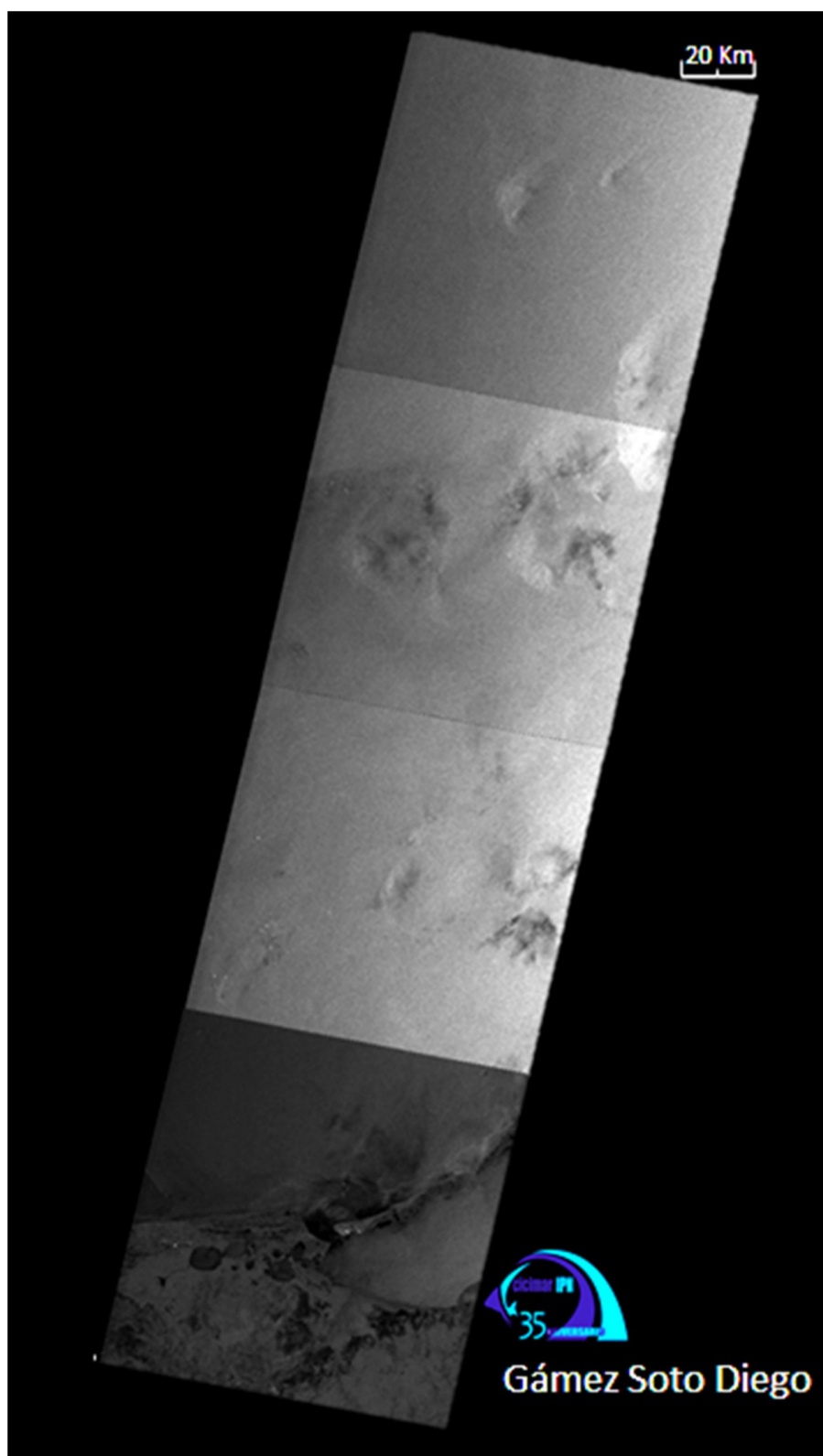
**Figura 42.** Subimagen 11O234201310351 (cuadro n). Desembocadura del Río Tonalá (A). Zona frontal formada por el sistema Río Tonalá-Laguna del Carmen, Pajonal y Machona (B).

## 7.6 Imágenes del 14 de octubre 1999.

Para esta fecha se analizaron 4 imágenes en el paso descendente las cuales se ilustran en el MVN (Fig. 43). En la figura 44, se observa el paso completo del SAR, el cual está dominado por celdas de lluvia (cuadros ñ, o y p), así como diferentes fenómenos frente a la Laguna de Términos. Es importante mencionar que en la imagen 16O2344114103195 (cuadro o) se detectó Cayo Arcas, punto de exportación de crudo, en el cual como se mostrará con mayor detenimiento, la poca presencia de contaminantes (derrames de hidrocarburos) en su entorno. Esto a pesar de la detección de algunos buques-tanque alrededor de este lugar (Cayo Arcas).

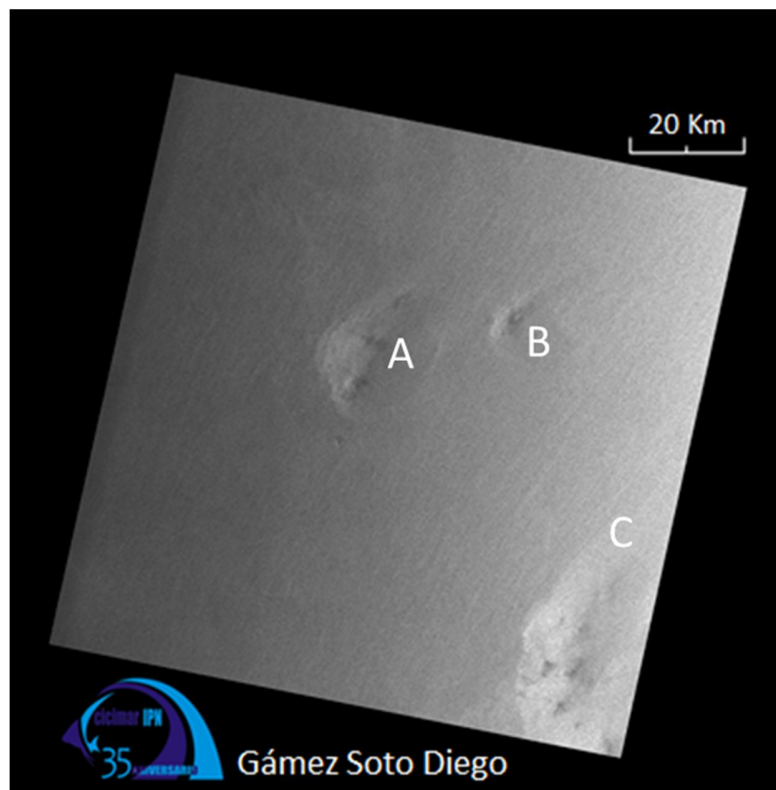


**Figura 43.** Imagen virtual donde se localiza el paso descendente 14 de octubre.



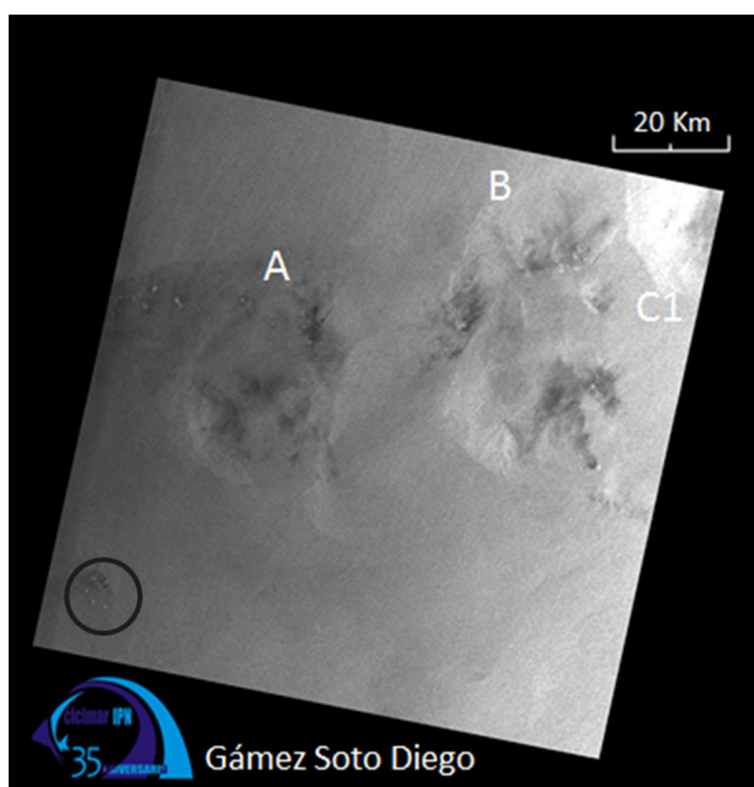
**Figura 44.** Mosaico 2 paso descendente del 14 de octubre de 1999.

En la imagen 15O2344114103177 (cuadro ñ), sobresalen tres estructuras formadas por celdas de lluvia, las cuales se encuentran delimitadas por zonas. La primer celda (Zona A), presenta unas dimensiones de 9x4 km, la segunda celda (Zona B) posee unas dimensiones de 18x10 km, la tercera (Zona C) que ocupa gran parte de la imagen posee dimensiones de 30x20 km. Estás no solo varían en dimensiones, sino también en valores de retrodispersión, ya que las que presentan diferencias mayores, es porque la lluvia es más intensa, además de las celdas de lluvia se observan VR en toda la imagen (Fig. 45).



**Figura 45.** Imagen 15O2344114103177 del 14 de octubre (cuadro ñ), celdas de lluvia, poco intensas (valores considerables de retrodispersión). Vórtices en Rollo (VR).

Nuevamente, en la imagen 16O2344114103195 (cuadro o), se observan celdas de lluvia, más intensas y de mayor tamaño. En la esquina superior derecha (C1), es la continuación de la celda C de la imagen “ñ”. Esta estructura (C1 con una dimensión aproximada de 18x13 km más la celda C) presenta una dimensión aproximada de 48x20 km. Las otras dos celdas de lluvia (A y B) de la imagen 16O2344114103195, tienen dimensiones de 50x35 km y 30x30 km, respectivamente, nuevamente se observan VR pero con longitudes menores, lo cual afecta su detección (Fig. 46).



**Figura 46.** Imagen 16O2344114103195 del 14 de octubre (cuadro o), celdas de lluvia intensas (valores bajos de retrodispersión). Vórtices en Rollo (VR). Cayo Arcas (círculo).

En la parte inferior izquierda de esta imagen se detectó Cayo Arcas y cuatro barcos de 200 m de eslora aproximadamente (Fig. 47). Alrededor de este lugar, ni en de los barcos, no se aprecian considerables derrames de hidrocarburos.





**Figura 47.** Subimagen 16O2344114103195. Detección de Cayo Arcas y cuatro barcos petroleros.

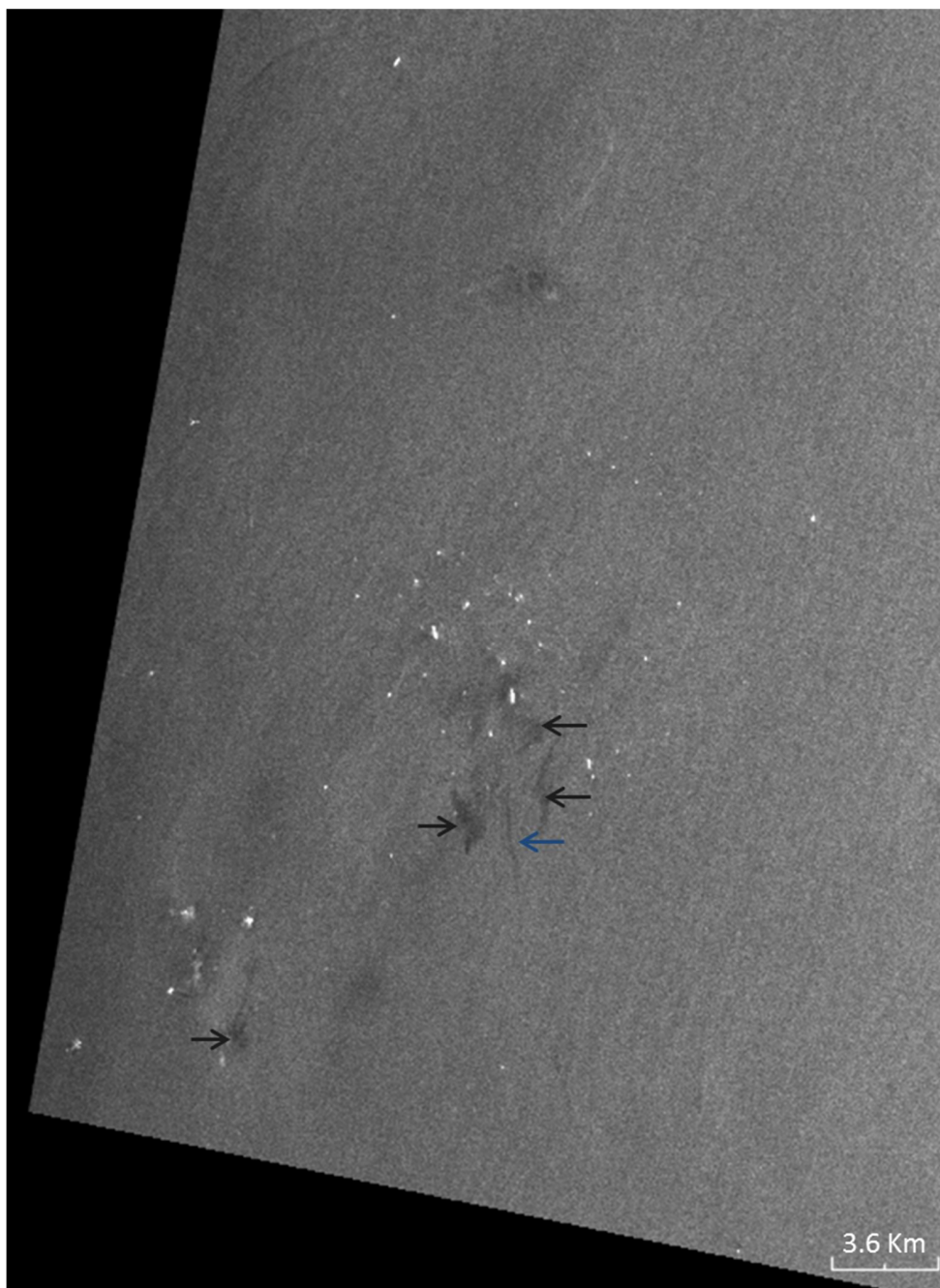
En la imagen 17O2344114103213, se detectan otras tres celdas de lluvia, con dimensiones menores que las anteriores y de menor intensidad, dados los diferentes datos de retrodispersión que presentan. La menos intensa se localiza en la parte central de la imagen, con unas dimensiones de 10.5x4 km (A), la segunda, es relativamente más intensa (B) y tiene unas dimensiones de 14.6x20 km. La más intensa (C) presenta unas dimensiones de 15x15 km. Adicionalmente sobresalen, un conjunto de puntos con altos valores de retrodispersión, correspondiendo a las plataformas petroleras de la Sonda de Campeche. Es de mencionar la presencia de contaminación superficial alrededor de las plataformas, observada mediante valores bajos de retrodispersión (Fig. 48).





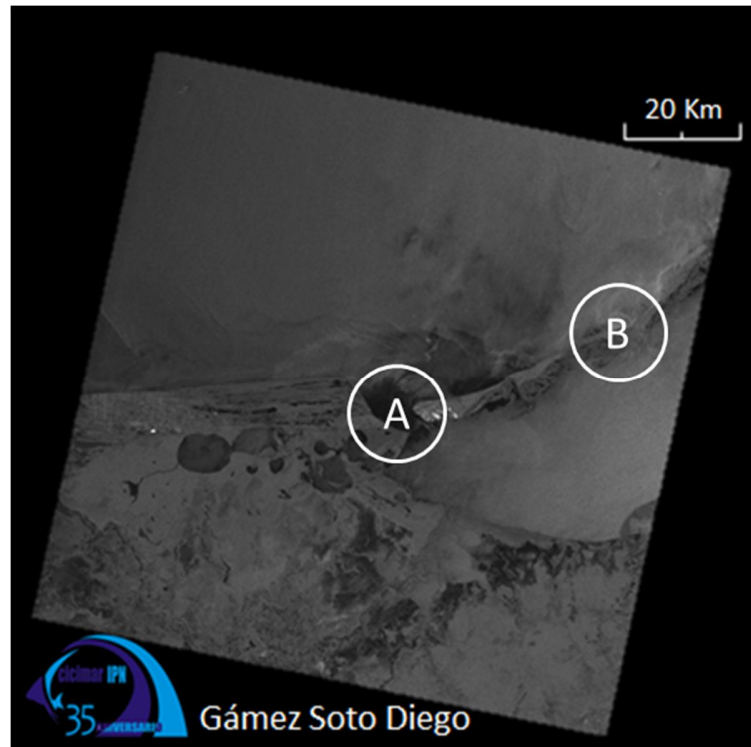
**Figura 48.** Imagen 17O2344114103213 del 14 de octubre (cuadro p). Detección celdas de lluvia. Poco intensa (A). Relativamente intensa (B). Muy intensa (C). Sonda de Campeche (puntos brillantes).

En la figura 49, como ya se mencionó anteriormente, se puede observar un gran número de plataformas en la Sonda de Campeche. Referente a los derrames superficiales, son visibles 4 manchas (flechas negras) y un filamento (flecha azul) alrededor de las plataformas centrales y en las localizadas en la parte inferior izquierda. La primera presenta una longitud de 3.5 km, la segunda de 2.6 km, la tercera 1.7 km, la cuarta de 3.5 km y el filamentos de 2.1 km.



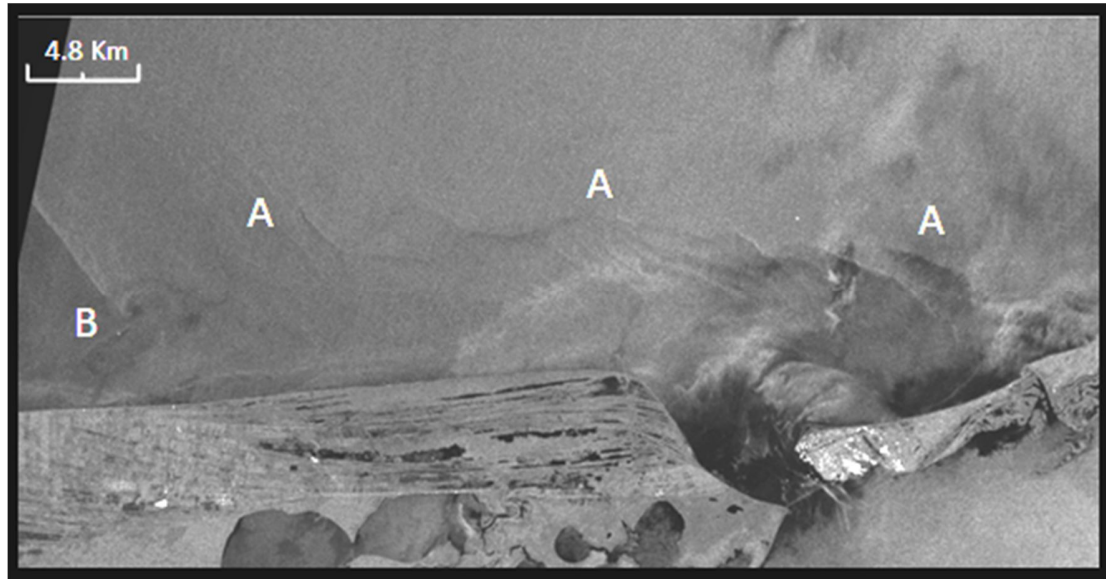
**Figura 49.** Subimagen 17O2344114103213. Sonda de Campeche y derrames superficiales de hidrocarburos (manchas oscuras).

La imagen 18O2344114103231 (cuadro q) se presenta muy compleja, observándose el oeste de Laguna de Términos. En esta imagen se registra la incidencia de fenómenos oceanográficos y meteorológicos en la parte oceánica, por lo que es difícil de su reconocimiento. Por otra parte, se puede distinguir la batimetría del fondo en la zona de Puerto Real (Fig. 50).



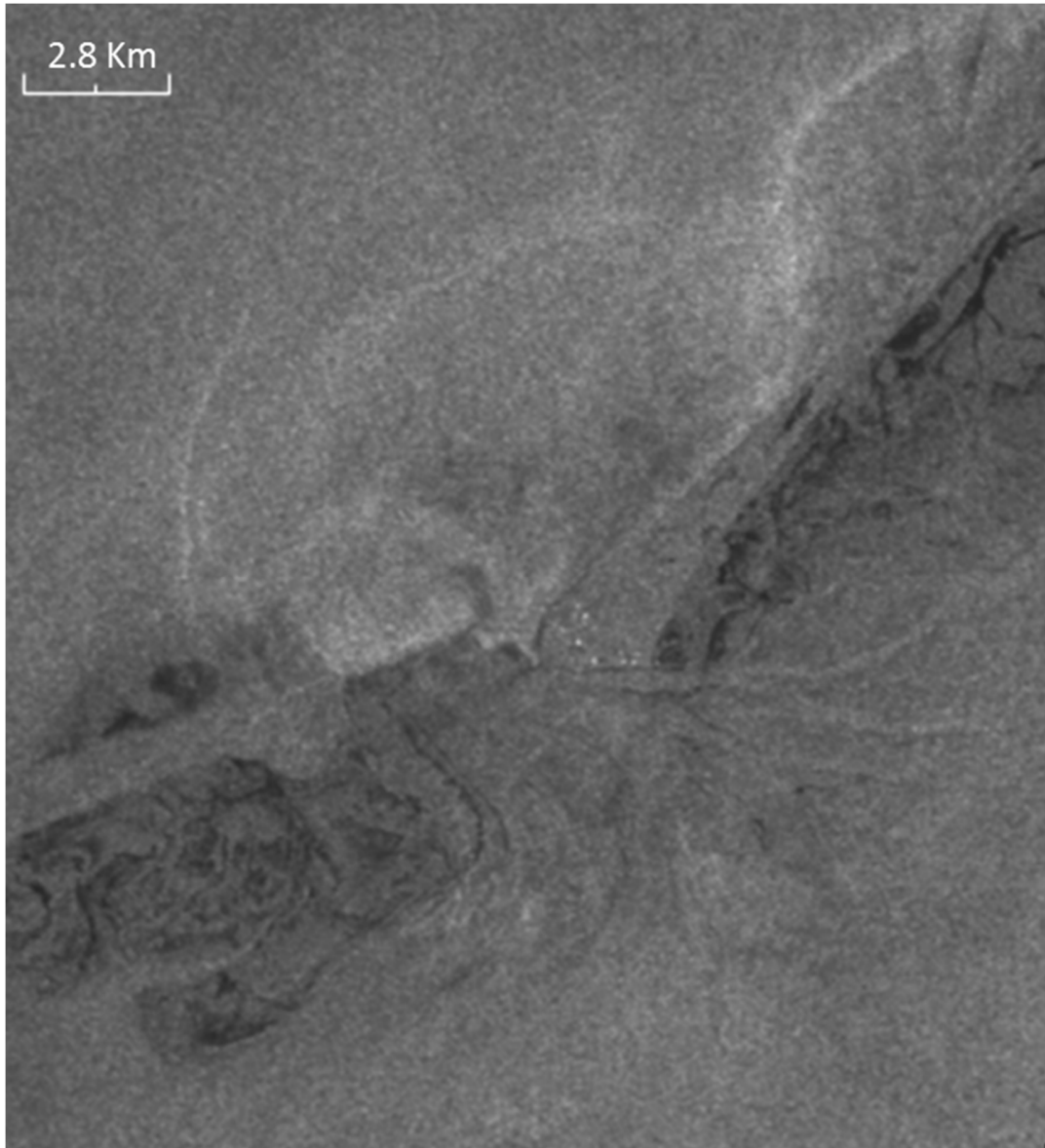
**Figura 50.** Imagen 18O2344114103231 del 14 de octubre (cuadro p). Zona de la Laguna de Términos y fenómenos asociados. A) Boca del Carmen. B) Boca Puerto Real.

En la parte oceánica de la zona se puede observar una estructura de forma frontal (A), separando aguas costeras y oceánicas, presentando un remolino pequeño en el extremo de este (B). En la parte de la Boca del Carmen son visibles estructuras complejas, con zonas de alta y baja retrodispersión, relacionadas a la dinámica de la boca y al transporte litoral de sedimentos que se dirige al oeste de la Boca del Carmen que tiene un ancho promedio de 3.8 km y profundidad de 18 m (Fig. 51).



**Figura 51.** Primer subimagen 18O2344114103231. Zona de la Boca de Carmen. Zona frontal (A) y remolino ciclónico (B).

En la subimagen 18O2344114103231, se observa la zona de la Boca de Puerto Real, detectándose diferentes estructuras con altos valores de retrodispersión, en la parte oceánica. En la boca se detectan líneas de muy baja retrodispersión propias de la CCP que entra a la Laguna de Términos por esta boca. En el interior de la laguna se observa la señal superficial de la batimetría, debido a que es relativamente somera 14 m y tiene un ancho estimado de 3.2 km (Fig. 52).

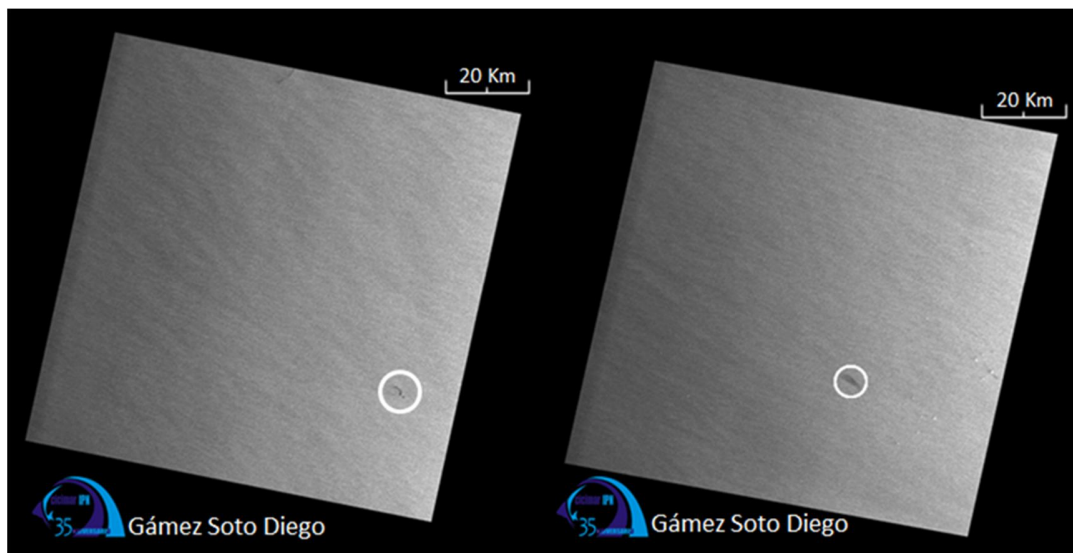


**Figura 52.** Segunda subimagen 18O2344114103231. Boca Puerto Real, altos valores de retrodispersión en la parte oceánica y detección del fondo en la laguna.

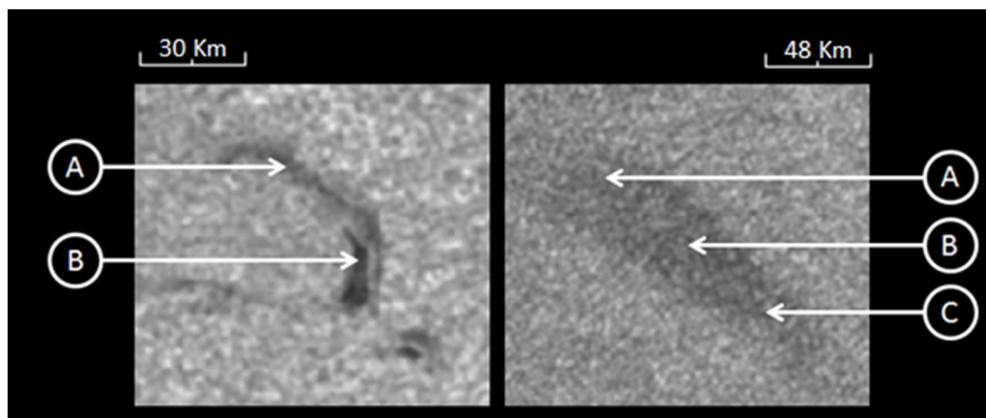
## 7.7 Cálculo del Coeficiente Normalizado de Retrodispersión $\sigma^0$ .

### 7.7.1 Derrames o Manchas Naturales (Chapopoterías).

Para los derrames o manchas naturales (Chapopoterías), se obtuvieron los siguientes resultados: en las imágenes, 02O232122893195 (cuadro b) y 03O232122893213 (cuadro c), del 28 de septiembre (Fig. 53), se visualizaron de forma óptima cada mancha detectada, mediante subimágenes. Los círculos representan áreas de interés, las flechas señalan el área de interés (Fig. 54). Se tomó un número digital de cada una de las áreas y se calculó su valor de  $\sigma^0$ , los cuales se muestran en la tabla 1.



**Figura 53.** Cálculo de  $\sigma^0$  en imágenes SAR del 28 de septiembre 02O232122893195 (cuadro b) y 03O232122893213 (cuadro c). Chapopoterías de 2.4 km y 4.8 km encerradas en los círculos.



**Figura 54.** Subimágenes chapopoteras con sus respectivas áreas de interés. Chapopotera 2.4 km en la imagen 02O232122893195 (cuadro b). Chapopotera 4.8 km en la imagen 03O232122893213 (cuadro c).

**Tabla 1.** Valores  $\sigma^0$ , chapopoteras detectadas el día 28 de septiembre.

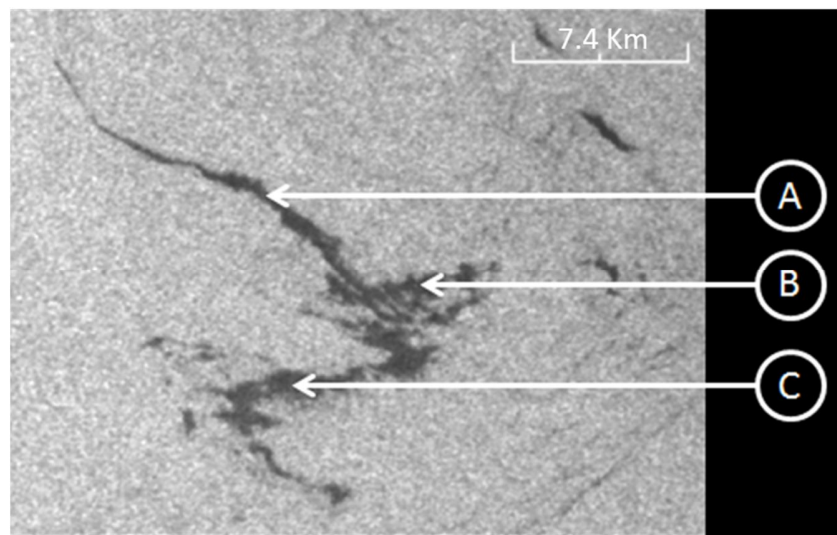
| 02O232122893195<br>cuadro b | 03O232122893213<br>cuadro c |
|-----------------------------|-----------------------------|
| a) -7.35 dB                 | a) -10.41 dB                |
| b) -4.19 dB                 | b) -0.47 dB                 |
|                             | c) -8.87 dB                 |

En la imagen g del 7 de octubre (Fig. 55), se detectó un tercer derrame natural de 20 km, el cual se visualizó de manera más clara, mediante subimágenes. Una vez más los círculos, representan áreas de interés, y las flechas señalan el área de interés (Fig. 56). A cada número digital de cada área, se le calculó su valor de  $\sigma^0$ , los cuales se muestran en la tabla 2.





**Figura 55.** Cálculo  $\sigma^0$  en la imagen SAR del 7 octubre 07O233347100405 (cuadro g). Chapopotera de 20 km encerrada en el círculo.



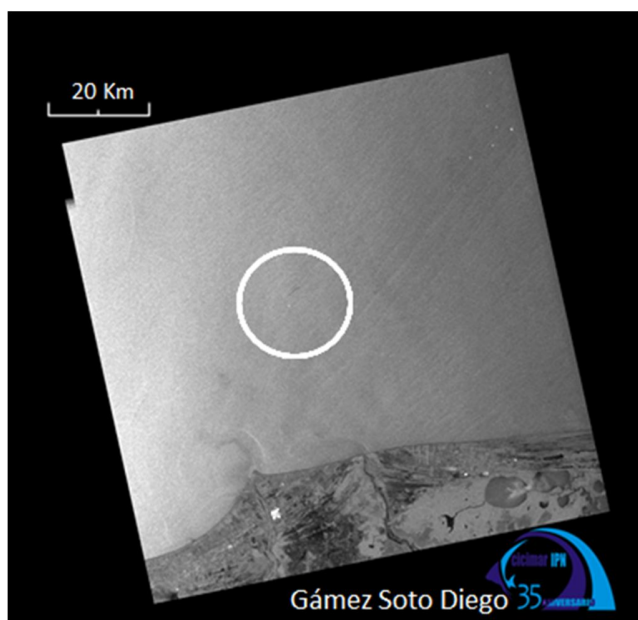
**Figura 56.** Subimagen 07O233347100405 (cuadro g). Chapopotera de 20 km con tres áreas de interés para el cálculo de  $\sigma^0$ .

**Tabla 2.** Valores de  $\sigma^0$  chapopotera detectada el día 7 de octubre.

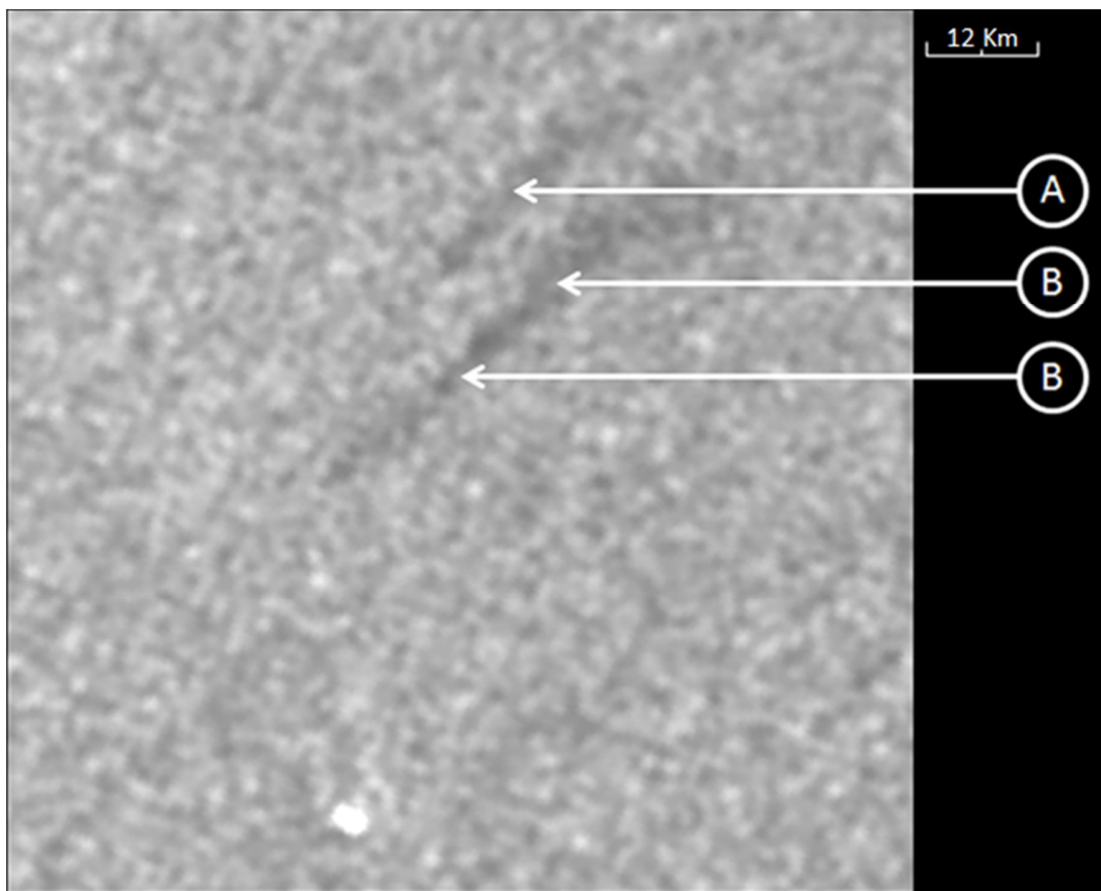
| 07O233347100405 |
|-----------------|
| cuadro g        |
| a) -22.15 dB    |
| b) -15.37 dB    |
| c) -11.17 dB    |

### 7.7.2 Derrames o Manchas Causadas por la Actividad Petrolera.

En la imagen del 10 de octubre 08O233771010369 (cuadro j), en el centro tenemos la presencia de dos filamentos de petróleo, uno de 2.7 y otro de 1.7 km. A 2.21 km de los filamentos, se detectó un barco que pudo haber sido el causante de dichos filamentos (Fig. 57). En la figura 58, encerrados en los círculos se observan las áreas de interés; las flechas señalan las áreas de interés de las cuales se tomó un número digital, para el cálculo de su valor  $\sigma^0$ , los cuales se muestran en la tabla 3.



**Figura 57.** Filamento de petróleo detectado en la imagen 08O233771010369 del 10 de octubre (cuadro j).



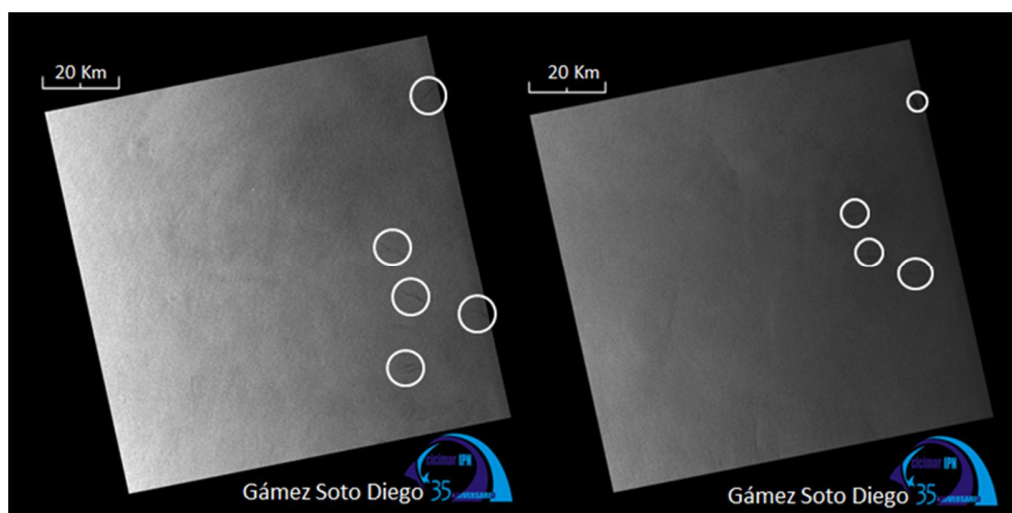
**Figura 58.** Subimagen de la imagen 08O233771010369 del 10 de octubre (cuadro j). Filamentos de petróleo de 1.68 km (superior) y 2.7 km (inferior), con tres áreas de interés para el cálculo de  $\sigma^0$ .

**Tabla 3.** Valores de  $\sigma^0$ , filamento detectado el día 10 de octubre.

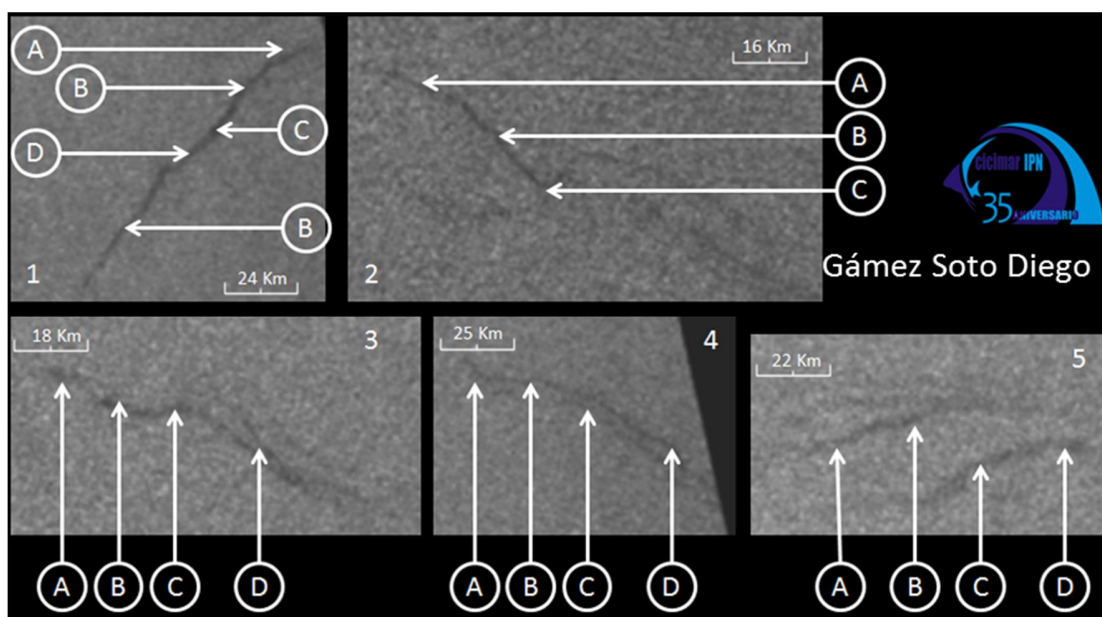
| 08O233771010369<br>cuadro j |
|-----------------------------|
| a) -10.09 dB                |
| b) -6.21 dB                 |
| c) -4.91 dB                 |

En las imágenes 14O234201310405 (cuadro k) y 13O2342013100387 (cuadro l) del 13 de octubre, se detectaron 9 derrames o filamentos en total, presuntamente causados por barcos visualizados en la imagen SAR. En la imagen 14O234201310405, el primero de 5.59, el segundo de 8.40 km, el tercero de 6.17 km, el cuarto de 4.54 km y en el quinto se observan dos filamentos uno de 3.89 km y el segundo 2.86 km; finalmente en la imagen 13O2342013100387, el primero de 3.71 km, el segundo de 2.65 km, el tercero de 5.75 km y cuarto de 2.40 km (Fig. 59).

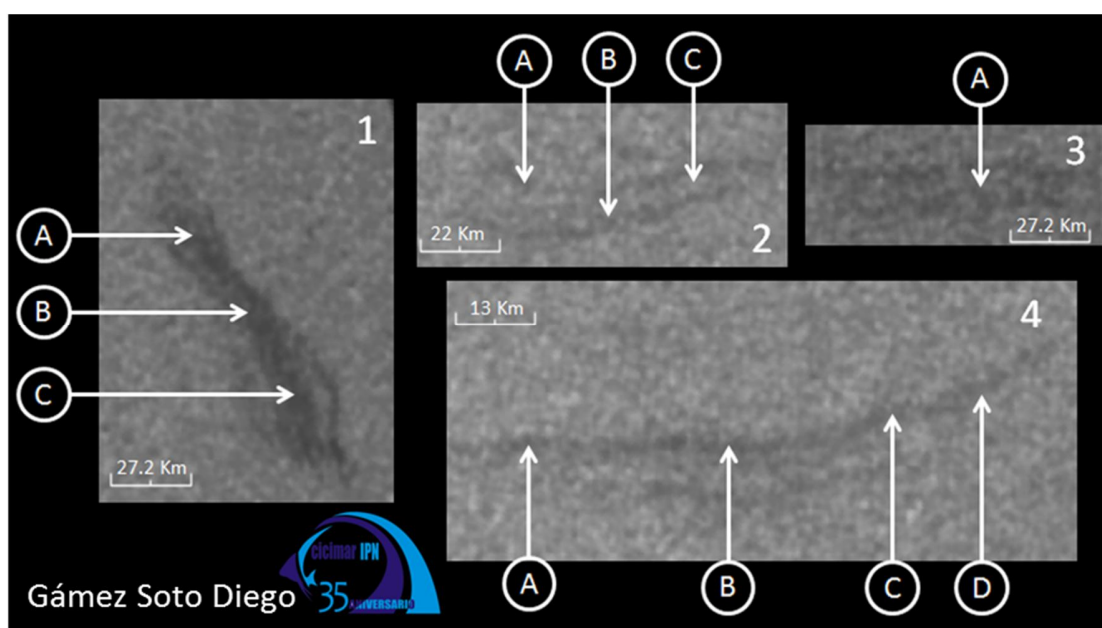
Por medio de la figuras 60 y 61, se visualizarán de manera más clara cada filamento detectado en cada imagen. Se asignó un número a cada filamento correspondiente a cada imagen, para su distinción y las áreas de interés variaron dependiendo del tamaño del filamento. Nuevamente los círculos representan áreas de interés; dentro de cada círculo se tomó un número digital y se calculó su valor de  $\sigma^0$ , los cuales se muestran en la tabla 4 y 5.



**Figura 59.** Imágenes SAR del 13 de octubre, 14O234201310405 (cuadro k) y 13O2342013100387 (cuadro l). Cálculo de  $\sigma^0$  filamentos causados por la actividad petrolera.



**Figura 60.** Subimagen de la imagen 14O234201310405 (cuadro k) del 13 de octubre. Filamentos detectados el 14 de octubre, enumerados y con sus respectivas áreas de interés.



**Figura 61.** Subimagen de la imagen 13O2342013100387 (cuadro l) del 13 de octubre. Filamentos detectados enumerados y con sus respectivas áreas de interés.

**Tabla 4.** Valores de  $\sigma^0$ , filamentos detectados el día 13 de octubre.

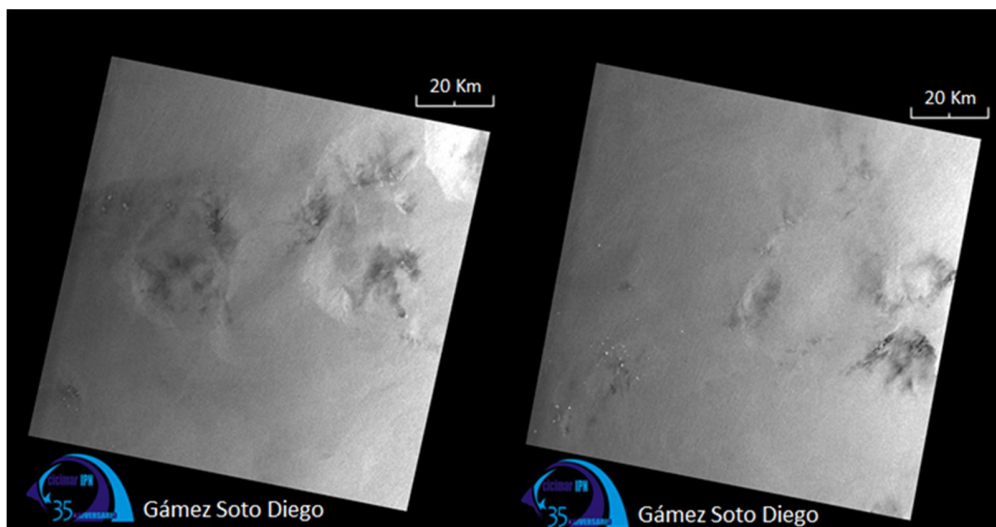
| <b>14O234201310405</b><br><b>cuadro k</b><br><b>Longitud del</b><br><b>derrame</b> | <b>Número</b><br><b>de áreas</b><br><b>de interés</b> | <b>Valor <math>\sigma^0</math></b>                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 5.9 km                                                                             | 5                                                     | a) -5.44 dB<br>b) -17.50 dB<br>c) -14.79 dB<br>d) -8.76 dB<br>e) -8.28 dB |
| 8.40 km                                                                            | 3                                                     | a) -7.75 dB<br>b) -11.04 dB<br>c) -4.16 dB                                |
| 6.17 km                                                                            | 4                                                     | a) -5.90 dB<br>b) -7.01 dB<br>c) -7.14 dB<br>d) -10.78 dB                 |
| 4.54 km                                                                            | 4                                                     | a) -11.21 dB<br>b) -15.55 dB<br>c) -6.58 dB<br>d) -11.49 dB               |
| 3.89 y 2.86 km                                                                     | 4                                                     | a) -10.69 dB<br>b) -9.14 dB<br>c) -8.58 dB<br>d) -2.04 dB                 |

**Tabla 5.** Valores de  $\sigma^0$ , filamentos detectados el día 13 de octubre.

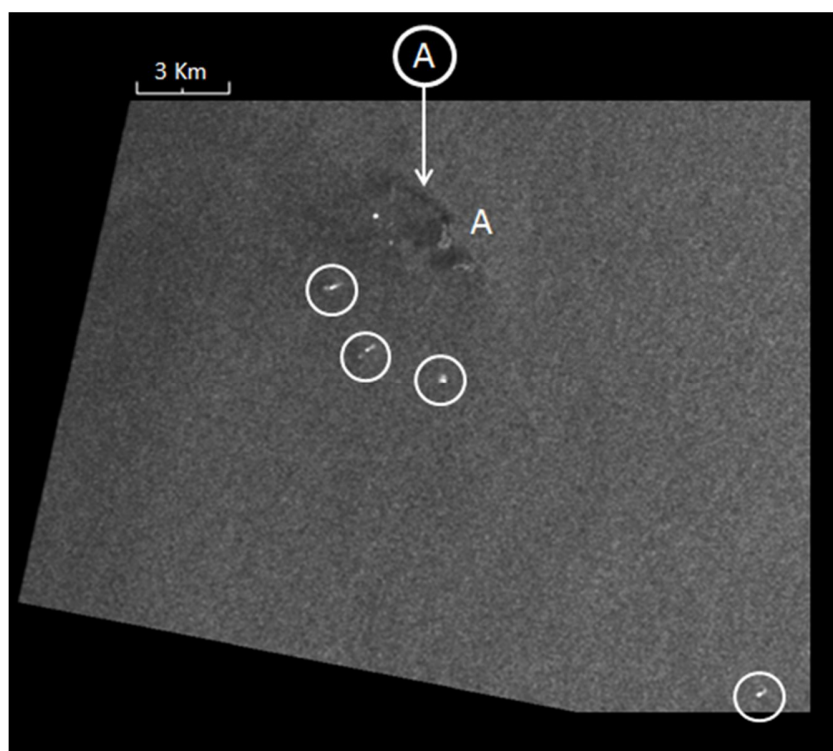
| <b>13O234201310405</b><br><b>cuadro l</b><br><b>Longitud del</b><br><b>derrame</b> | <b>Número</b><br><b>de áreas</b><br><b>de interés</b> | <b>Valor <math>\sigma^0</math></b>                       |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 3.71 km                                                                            | 3                                                     | a) -6.47 dB<br>b) -2.02 dB<br>c) -7.01 dB                |
| 5.75 km                                                                            | 3                                                     | a) -5.84 dB<br>b) -4.36 dB<br>c) -2.41 dB                |
| 2.65 km                                                                            | 1                                                     | a) -8.34 dB                                              |
| 2.40 km                                                                            | 4                                                     | a) -4.70 dB<br>b) -9.11 dB<br>c) -8.28 dB<br>d) -2.12 dB |

El 14 de octubre, se detectó una reducida contaminación superficial en Cayo Arcas (A), solo fue detectable una sola mancha de menos 2.42 km en la imagen 16O2344114103195 (cuadro o). Por otra parte en la imagen 17O2344114103213 (cuadro p), en la cual es visible la Sonda de Campeche, se observó una considerable presencia de contaminación superficial alrededor de algunas plataformas son visibles 3 manchas de 2 a 4 km y dos filamentos de 2 a 6 km (Fig. 62). Por medio de las figuras 63 y 64, se visualizarán de manera más clara, cada filamento detectado en cada imagen y los valores se encuentran en la tabla 6.

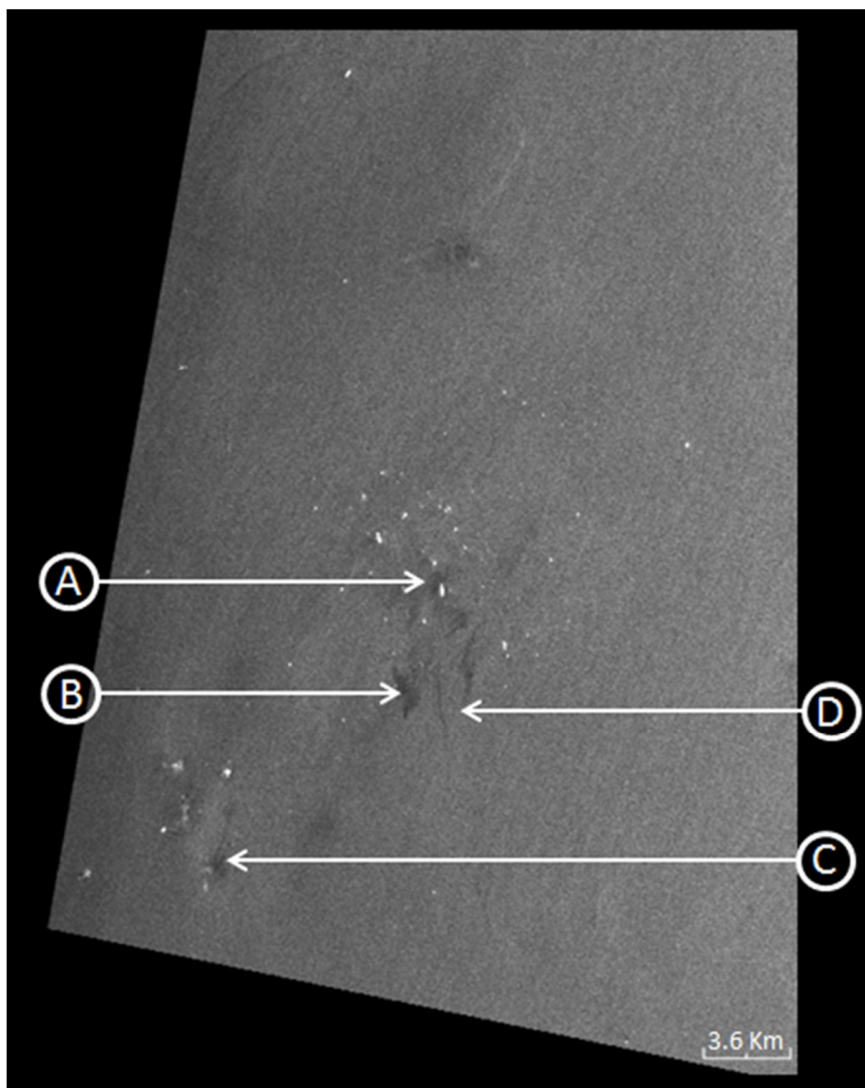




**Figura 62.** Imágenes SAR del 14 de octubre 16O2344114103195 (cuadro o) y 17O2344114103213 (cuadro p). Cálculo de  $\sigma^0$  en filamentos causados por la actividad petrolera.



**Figura 63.** Subimagen de la imagen 16O2344114103195 (cuadro o) del 14 de octubre. Reducida contaminación superficial en Cayo Arcas. Área de interés círculo “A”. Los buques tanque están encerrados en los círculos.



**Figura 64.** Subimagen de la imagen 17O2344114103213 (cuadro p) del 14 de octubre.  
Contaminación superficial causada actividad petrolera, en la Sonda de Campeche.

**Tabla 6.** Valores de  $\sigma^0$ , contaminación superficial en Cayo Arcas y la Sonda de Campeche.

| <b>16O2344114103195</b><br><b>cuadro o</b><br><b>Longitud del derrame</b> | <b>Número de</b><br><b>áreas</b><br><b>de interés</b> | <b>Valor <math>\sigma^0</math></b> |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 2.42 km                                                                   | 1                                                     | a) -10.89 dB                       |
| <b>17O2344114103213</b><br><b>cuadro p</b><br><b>Longitud del derrame</b> | <b>Número de</b><br><b>áreas</b><br><b>de interés</b> | <b>Valor <math>\sigma^0</math></b> |
| 3.48 km                                                                   | 1                                                     | a) -5.13 dB                        |
| 2.64 km                                                                   | 1                                                     | b) -12.38 dB                       |
| 1.69 km                                                                   | 1                                                     | c) -3.77 dB                        |
| 3.52 y 2.09 km                                                            | 1                                                     | d) -10.92 y<br>-8.24 dB            |

## VIII DISCUSIÓN

Como se pudo observar en los resultados anteriores, el procesamiento y manipulación de las imágenes SAR, así como la observación de los fenómenos oceanográficos y atmosféricos, representan tareas muy complejas. Concientes de tal complejidad, las diferentes agencias que suministran estas imágenes, como la ESA, CSA y NASA, editan manuales, para identificación de diferentes fenómenos meteorológicos y oceanográficos, que se observan en este tipo de imágenes. Lo anterior ha sido de gran ayuda y como una valiosa herramienta complementaria a los artículos científicos publicados en esta materia.

Cabe hacer mención que el campo de ondas capilares que se forman en el océano, forman una pantalla en la que se ven reflejados tanto fenómenos atmosféricos como oceánicos superficiales y subsuperficiales. Las líneas oscuras que permiten la visualización en las imágenes SAR de diferentes fenómenos de mesoescala como corrientes, remolinos, estelas, etc., son una expresión de la modulación de retrodispersión inducida por la interacción entre las ondas capilares y los fenómenos anteriormente mencionados (Lyzenga *et al.*, 2004).

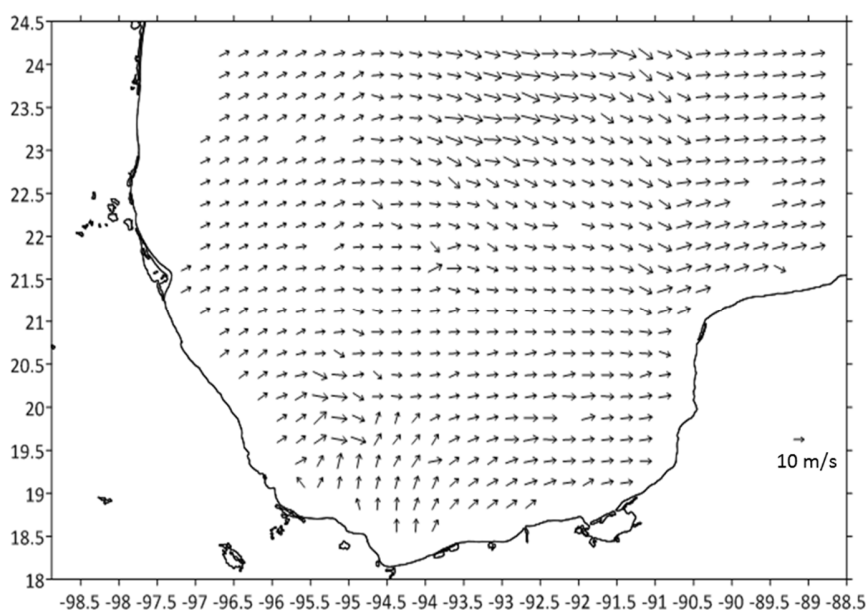
Los vórtices en rollo fueron los principales fenómenos detectados en el paso del día 28 de septiembre, visibles en las cuatro imágenes que conforman la serie (cuadros a, b, c, d), principalmente en las imágenes “a” y “b”. Sikora y Ufermann (2004), mencionan que el principal mecanismo del desarrollo de estos rollos generados por el viento, es la inestabilidad termodinámica en un ambiente con considerable cizalladura o gradiente de viento. Los ejes de estos rollos están orientados paralelos a los vectores de cizalladura/gradiente del viento. Regiones ascendentes y descendentes de la circulación llevan a un incremento y decremento de la rugosidad de la superficie del océano, resultando en líneas de altos y bajos valores de retrodispersión (Alpers y Brümmer, 1994; Babin *et al.*, 2003).

Fu y Holt (1982a), muestran una imagen SAR del Seasat del norte del Océano Atlántico, y hacen mención del mismo fenómeno (VR), al que ellos denominan Rollos de Viento (Wind Rolls) y lo describen como una estructura

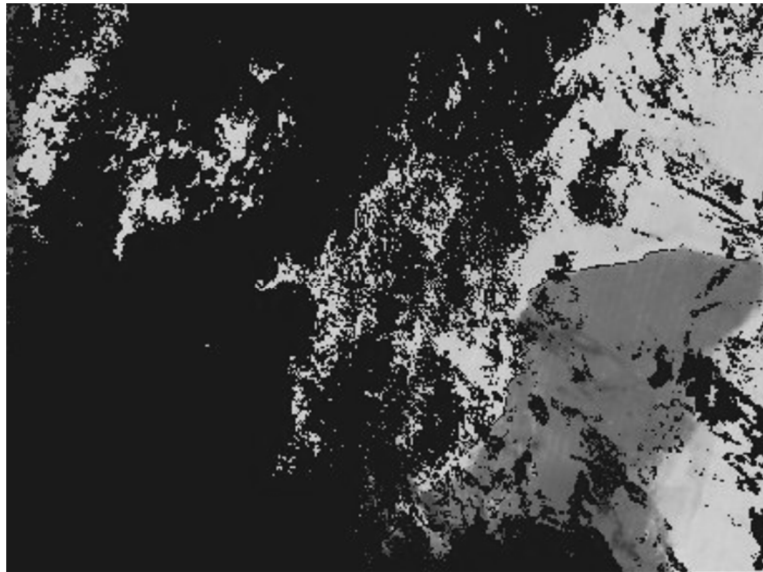
periódica en la dirección del viento, que cruza de forma perpendicular a la dirección del viento (vector de viento).

Asimismo, la ESA en su portal web (esa@) exhibe en galerías de imágenes diferentes fenómenos entre ellos los rollos de capa limite (windrows o trenes de vórtices horizontales de larga longitud, con direcciones intercaladas), con una gran similitud a las presentadas en el presente trabajo. En el portal web, se explica el fenómeno como una anomalía o inestabilidad en la interface océano-atmosfera, que surge por cambios en la temperatura del aire como la del mar. En la figura 65, se observan los campos de viento, en paso descendente, obtenidos del SeaWinds-QuikScat en el que se pueden observar que los vientos son intensos, de 13 m/s (47 km/h), y su dirección es la misma que la correspondiente a los vórtices en rollo.

En adición a lo anterior, se puede observar una amplia cobertura de nubes que se presentó en la imagen de temperatura (TSM), el mismo día 28 de septiembre. Lo anterior revela unas condiciones atmosféricas adversas, con vientos fuertes y una amplia cobertura de nubes, presentándose condiciones apropiadas para la generación de las hileras de vórtices horizontales de larga longitud (vórtices en rollo) (Fig. 66).



**Figura 65.** Campo de vientos del 28 de septiembre de 1999, en paso descendente.



**Figura 66.** Imagen de temperatura superficial del mar (TSM) del sensor NOAA-AVHRR del 28 de septiembre 1999. Se observa una cobertura de nubes muy importante (color negro).

Los frentes tipo pluma de río en las desembocaduras de los ríos Grijalva, Gonzalez y San Pedro y San Pablo (Figs. 11 a 15), fueron registrados en las imágenes SAR como líneas brillantes y/u oscuras, debido a que en la zona de convergencia del frente se concentran las ondas capilares, razón por la cual presentan una firma de alta retrodispersión en las imágenes SAR, este comportamiento fue analizado por Johannessen *et al.* (1993) y Shirasago (1996). La desviación de los frentes hacia la izquierda, al parecer es debido a la influencia de la Corriente Costera Permanente, que fluye con dirección oeste en esta región de las costas de la Bahía de Campeche, según Zavala-Hidalgo *et al.* (2003b). Por su parte, Sturges *et al.* (2005), analizaron la circulación en el Golfo de México, tomando como punto de importancia los frentes causados por las descargas de los ríos, por medio de un modelo numérico, imágenes de temperatura y altimetría, obteniendo diferentes estructuras en los patrones de la circulación.

En períodos de constantes lluvias, los frentes pluma de río, tienden a presentar una inclinación hacia la derecha (oeste) al estar en el medio marino, este comportamiento es totalmente respaldado por lo mostrado en la imagen SAR. Sturges *et al.* (2005), analizaron la circulación en el Golfo de México por medio de

observaciones y la creación de modelos, tomando como punto de importancia los frentes causados por las descargas de los ríos y detectaron diferentes estructuras por medio de imágenes de temperatura y altimetría, como frentes pluma de río y frentes lagunares.

Sin embargo, es importante considerar la resolución espacial con la que operan los sensores pasivos, la cual es del orden de kilómetros, y la del radar del orden de metros, por lo cual es mucho más eficiente al detectar este tipo de estructuras. Anudado a esto, existen sensores pasivos que operan con una gran resolución, pero con una mucha menor cobertura y más costosos, como por ejemplo el QuickBird.

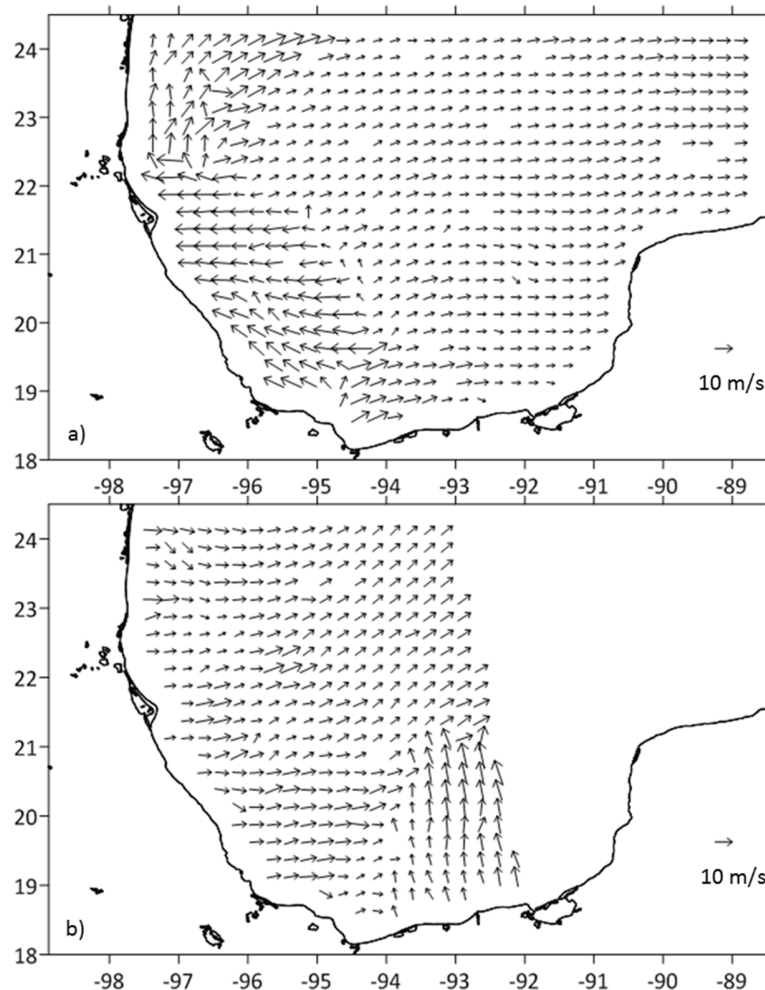
Con respecto a las líneas cuasi perpendiculares, en la figura 11 no se logró identificar su origen, pero es muy posible que estén relacionadas a la corriente costera antes mencionada (CCP) y al transporte litoral (60 km de la costa), asociado al parecer de la zona de la Laguna de Términos, según Beach *et al.* (2005), esta laguna recibe grandes volúmenes de flujos de agua dulce que varían según las estaciones de una cuenca de 49,700 kilómetros cuadrados que drena partes de la Península de Yucatán, las tierras bajas de Tabasco y las tierras altas de Chiapas, provocando un gran transporte de sedimentos hasta el río Grijalva, donde posteriormente se dispersan hacia mar abierto. Estas líneas son visibles en imágenes del visible, lo cual puede dar la pauta para futuras investigaciones, usando sensores pasivos.

En cuanto a los fenómenos atmosféricos y oceánicos detectados en las imágenes del día 7 de octubre, los frentes de viento fueron detectados porque en su firma de retrodispersión, se observan dos amplias zonas, una con valores altos y otra con valores muy bajos. Lo anterior es producto de la marcada diferencia de velocidad y dirección en el campo de viento, presentándose una importante cizalladura entre vientos fuertes y débiles, esto es reportado por Babin *et al.* (2003), Shirasago (1996) y por el portal web de la esa@, quienes concuerdan con lo mencionado anteriormente.



Desafortunadamente, para este día no se contó con datos de campos de viento, debido a las condiciones tan ambiguas para el sensor satelital (SeaWinds), en los que debieron de haber existido diferentes direcciones del viento y una amplia zona de calmas, lo cual se deduce de la imagen SAR. Asimismo, de los datos de campos de viento procesados por Sanchez (2011), se puede observar que hubo una variabilidad muy importante de los campos de viento incluso diariamente, presentándose importantes zonas frontales de viento en varios días.

En la figura 67 se muestran los campos de viento correspondientes a los días 12 y 15 de octubre en paso ascendente, en las que se puede observar estas zonas frontales de viento.



**Figura 67.** Campos de vientos evidenciando zonas frontales de vientos. a) 12 de octubre y b) 15 de octubre.

Es de destacar los fenómenos asociados a la zona frontal, observada el 7 de octubre en las imágenes SAR, como son los dos remolinos ciclónicos aparentemente atmosféricos, las celdas convectivas atmosféricas y los vórtices en rollo. Frecuentemente se registran en las imágenes SAR, remolinos tanto atmosféricos como marinos, lo cual es difícil de discernir ya que éstos se detectan debido a que presentan líneas con muy bajos valores de retrodispersión. Un ejemplo de esto es la investigación realizada por Díaz de León (2001), sobre patrones de circulaciones en la parte Norte del Golfo de California, usando imágenes de Radar de Apertura Sintética del ERS-2. Con una serie compuesta por tres escenas, donde detectó tres giros, dos ciclónicos y uno anticiclónico, a través de líneas de baja retrodispersión. Estos remolinos en su mayoría pudieron haber sido generados por la dinámica oceánica de esta parte del golfo, pero algunos más pequeños aparentemente fueron ocasionados por fenómenos atmosféricos. Todos se observaron con la misma firma de retrodispersión, esto es con dichas líneas oscuras.

En lo referente a las ondas observadas dentro de la Laguna de Términos, éstas no han sido reportadas en la literatura, usando el Radar de Apertura Sintética (SAR). Sin embargo Mancilla *et al.* (1987), analizo series de altura de mareas y de corrientes de medidas en el interior y exterior de Laguna de Términos durante los años 1975 a 1982, las cuales penetran por la boca de Puerto Real. La finalidad del análisis fue evaluar el flujo neto de agua a través de la sección central de la laguna, encontrando una propagación de la ondas de marea, las cuales están sujetas a la dinámica de la laguna y al rose de estas con el fondo de la laguna, que es relativamente somera. Por lo tanto la propagación de estas ondas evidentemente modifica la rugosidad superficial de la laguna, lo cual permiten su posible detección, esto puede estar relacionado con lo detectado con las ondas detectadas en la imagen “g” de 7 de octubre.

Respecto a las tres firmas de retrodispersión, que se identifican como frentes en la imagen 07O233347100405 (cuadro e) del 7 de octubre de 1999 (Fig. 19), se puede mencionar que éstos posiblemente sean frentes marinos dada su señal de retrodispersión. Shirasago (1996), encontró una señal semejante

mediante imágenes SAR y datos de campo en el Río Palamós (España). Por otra parte, en el Estrecho de Taiwán se detectaron líneas con ese tipo de firmas, en las imágenes SAR del ERS-1 de 1994. Éstas representan frentes causados por la diferencia de temperaturas en las masas de agua en una determinada zona (esa@).

En la figura 68, se observa una imagen de color verdadero (true color) del 20 de diciembre del 2008, de la región donde se localiza el paso ascendente del SAR correspondiente al 7 de octubre. En ella se observa una extensa zona de color azul brillante y verde, sobre la amplia plataforma continental del Estado de Campeche, relacionada con material biológico o surfactante. En ella se detectan remolinos y estelas que se dirigen hacia mar abierto. Este tipo de estructuras se infiere que puedan estar relacionadas con las detectadas en las imágenes SAR, ya que forman frentes con respecto a las aguas de mar profundo.



**Figura 68.** Imagen de color verdadero (true color) MODIS Land Rapid. Se observan remolinos de material biológico o surfactante.

Johannessen *et al.* (1996) y Lyzenga *et al.* (2004), demostraron que estructuras de mesoescala como remolinos, frentes, estelas y corrientes, generan zonas frontales en los bordes de los mismos.

Con respecto a los remolinos ciclónicos asociados al frente de vientos, éstos no han sido documentados pero probablemente son resultado de la dinámica propia del frente, como ocurre en el detectado borde norte de dicho frente, o de otros fenómenos atmosféricos que pudiesen estar ocurriendo en la región, como fue el remolino ciclónico impactando la mancha de petróleo (Figs. 20 y 21). Es de destacar que, como este último remolino mencionado, que presenta una trayectoria bien definida sobre la superficie del mar, a través de líneas oscuras, ya han sido reportados por otros autores (Shirasago, 1996; Font *et al.*, 2002). En ningún caso se ha podido definir si son atmosféricos o marinos, debido a que son fenómenos de submesoescala, no estudiados hasta la fecha.

En las imágenes “f” y “g” (Figs. 22 y 26), son visibles celdas convectivas atmosféricas (CCA), en los bordes de una basta zona frontal. Estas estructuras atmosféricas aparecen en zonas de viento relativamente débiles, donde la temperatura superficial del mar es mayor a la del aire. En las imágenes de SAR se observa el moteado, con zonas más brillantes y oscuras que la zona circundante. Cabe mencionar que las CCA están acompañadas por otros fenómenos como una basta zona frontal de vientos, ondas internas atmosféricas (OI) y un remolino ciclónico (RC), influenciado por la CCP. Condiciones similares fueron reportadas por Sikora y Ufermann (2004) quienes describen la firma de retrodispersión que presentan estas CCA en las imágenes SAR y analizan los procesos que las generan, al este de las costas de Estados Unidos.

Con lo referente a los vórtices en rollo (VR/hileras) o rollos de viento (WR), éstos son generados por un ambiente de cizalladura (cambio de dirección y velocidad del viento). Asimismo, estos fenómenos atmosféricos han sido adecuadamente descritos por Sikora y Ufermann (2004), quienes afirman que estos rollos de viento (hileras) resultan de la inestabilidad de la capa límite océano-atmósfera, y por la magnitud de los vientos. Es de recordar que todos estos fenómenos ocurrieron en una región en la que las condiciones atmosféricas se encontraban dominadas por una fuerte variabilidad en los campos de viento, una importante cobertura de nubes y fuertes lluvias.

Por lo que corresponde a las ondas observadas en la Laguna de Términos, es probable que se originaran por la interacción de ráfagas de vientos fuertes del suroeste y como se mencionó anteriormente al flujo de la marea proveniente de la Boca de Puerto Real. Al parecer éstas no hay sido reportadas mediante percepción remota, por lo que en futuros estudios de este cuerpo lagunar aplicando el SAR, se sabrá más respecto a su origen y evolución.

En las imágenes correspondientes al 10 de octubre, no se registraron una importante cantidad de estructuras mesoescalares, sin embargo también se detectaron vórtices en rollo (VR/hileras), pero con una menor longitud que los detectados el día 28 de septiembre. Asimismo, se detectaron dos frentes de pluma de río, en el río Grijalva y San Pedro, cuya firma de retrodispersión es similar a la detectada en días anteriores, sin embargo éstas aparecen inclinadas en la dirección de la CCP. Es de destacar que en este paso se detectó un grupo de plataformas, pero sin evidencias de contaminación superficial por hidrocarburos.

En el paso del 13 de octubre, fueron visibles varias estructuras relacionadas con la dinámica mesoescalar de la zona, así como la presencia de filamentos de hidrocarburos superficiales. Lo más destacable de este paso, es la presencia de un gran remolino ciclónico con un sistema frontal asociado, compuesto por varios frentes alrededor de este remolino y dos giros con menores dimensiones dominando al sur. Lo anterior es posible detectarlo por las líneas brillantes y oscuras que los caracterizan. Estas líneas son causadas por una basta zona frontal y por la presencia de la CCP, la cual inicialmente se desplaza por el Banco de Campeche hasta llegar a la Bahía del mismo nombre (sct.gob.mx@; Aguirre-Gómez, 2002). Este gran remolino ha sido previamente descrito por Sanchez (2012), con imágenes de NOAA AVHRR. Lyzenga *et al.* (2004), abordan el tema de circulación oceánica, como corrientes y remolinos, así como los frentes causados por el encuentro de diferentes masas de agua, comparando imágenes de TSM y SAR-ESR-2, en la boca de la Bahía de Chesapeake.

En la imagen “n” destaca un frente de pluma de río causado por la descarga del Río Tonalá, el cual se une a los frentes lagunares que son visibles a lo largo de la línea de costa generada por la influencia de las lagunas del Carmen y Machona.

A su vez, al parecer este sistema frontal parece estar influenciado y desplazado hacia el este, debido a la corriente litoral que proviene del norte durante esta época del año (Sanchez, 2012; Zavala-Hidalgo, 2003b). Nuevamente en esta imagen, se detectan líneas casi paralelas a la costa, lo cual deberá ser tema de estudio en futuras investigaciones.

En las imágenes del 14 de octubre, sobresalen mayormente fenómenos atmosféricos denominados celdas de lluvia, los cuales son visibles en las tres primeras imágenes de la serie. Fu y Holt en 1982d, muestran una imagen donde son visibles celdas de lluvia a 160 kilómetros, en el este de Nueva Orleans.

A su vez Alpers y Melsheimer (2004), muestran y analizan diferentes firmas que tiene un fenómeno atmosférico como la lluvia, las cuales van de zonas con altos y bajos valores de retrodispersión (backscattering), a lo que denominan como celda de lluvia, en una imagen tomada por el ERS-1 el 3 de abril de 1996 en el mar de Andaman, muestran fuertes celdas de lluvia la cuales causan turbulencia y por ende causando zonas oscuras o de bajos valores de retrodispersión. Continuando con el análisis ellos (Alpers y Melsheimer, 2004) muestran dos imágenes del Golfo de Tailandia tomadas por el ERS-1 el 18 de abril de 1994, las cuales se muestran por cuadros. En la primera se muestra un conjunto moderado de celdas de lluvia las cuales varían en intensidad, ya que solo son visibles con zonas oscuras. Sin embargo, en la segunda se muestran seis celdas de lluvia que no solo varían en intensidad, sino en tamaño también.

En cuanto a la detección de manchas o derrames de petróleo, Simpson y James en 1986, evidenciaron que los frentes tipo pluma de río, son zonas de convergencia, que pueden inhibir la dispersión y dirigir la concentración de contaminantes (hidrocarburos) a lo largo del frente, su presencia modifica la circulación y los procesos de mezcla de modo que influye de manera significativa sobre la dispersión de los contaminantes en las aguas costeras, esto puede explicar la presencia de contaminantes superficiales en la desembocadura del Río Grijalva (Fig. 15). Lo que es evidenciado por Simpson y James, se muestra en las imágenes SAR, donde se detectaron frentes tipo pluma de río. Éste tipo de frente

se distingue del fondo por ser más brillante, por el hecho de ser una zona de convergencia.

González *et al.* (2009) realizaron un estudio de discriminación automática de vertidos de hidrocarburos a partir de imágenes ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), utilizando una máquina de vectores soporte (SVMs), ellos argumentan lo complejo que es la detección de hidrocarburos en áreas oceánicas en imágenes SAR, debido a la presencia de otros fenómenos que dan lugar como se mencionó a firmas o signatures similares a la de los vertidos. Por medio del tratamiento de 26 imágenes ASAR de la marea negra causada por el buque petrolero Prestige a finales del 2002, el cual se hundió frente a las costas de Galicia (España), ellos construyeron un algoritmo que forma parte de un sistema automático de detección de vertidos en imágenes ASAR, concluyendo que efectivamente la Máquina de Vectores Soporte (SVM) poseen un gran potencial, para la correcta clasificación de las asignaturas o manchas detectadas, y a su vez afirman que el algoritmo puede ser mejorado mediante la utilización de datos adicionales como el viento y un entrenamiento más complejo con otros tipos de contaminantes u otras zonas.

Pellón de Miranda *et al.* (2004) realizaron un estudio en el Golfo de México, monitoreando una mancha de petróleo causada por una fuga en el complejo Cantarell, en el cual se ha medido la máxima producción de la Sonda de Campeche. Utilizando para su rastreo un clasificador de texturas en imágenes RADASAT-1, detectaron y dieron seguimiento a una mancha de 74.23 km<sup>2</sup>. Otro derrame importante en el mencionado golfo, que fue objeto de estudio es, el ocurrido en abril del 2010, causado por una explosión que sacudió la plataforma petrolera Deepwater Horizon de la empresa Transocean, éste fue estudiado por medio de diferentes sensores remotos activos como pasivos, dentro de los cuales podemos mencionar el SAR a bordo del RADASAT-2 y el MODIS Aqua/Terra, los cuales se usaron para monitorear la evolución de la mancha de petróleo (cstars@).

El *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual* fue elaborado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) en el 2004, teniendo



como editores a Christopher R. Jackson y John R. Apel. Este manual contiene diferentes capítulos desarrollados por especialistas en cada área del funcionamiento y detección de fenómenos con el SAR. En el capítulo 11 *Oils and Surfactantes* se muestra una imagen tomada por el SAR a bordo del ERS-1 en el año de 1996, la cual muestra un grupo de plataformas petrolíferas (puntos brillantes) en el Mar Caspio, las cuales están rodeadas de manchas de petróleo, siendo estas plataformas bastante antiguas y es evidente que se filtra una gran cantidad de petróleo al mar (Alpers y Espedal, 2004).

Sin embargo, es importante mencionar los casos de afloramientos naturales o chapopoterías; ya que en las imágenes “b” y “c”, del día 28 de septiembre se detectaron dos Chapopoterías “CH”, sumamente alejadas de la zona donde se encuentran las plataformas petroleras, en este sentido, Soto *et al.* (2004) realizaron un estudio de ambientes influidos por emanaciones naturales de hidrocarburos y gas en el suroeste del Golfo de México. Reflexionando lo comunes que son los sitios naturales de emanación de hidrocarburo fósil y de gas metano, ellos consideran importante la detección de estas emanaciones naturales ya que constituyen el único medio de detección en superficie de los grandes yacimientos actualmente sujetos a explotación. Pero aunado a esto, en el medio marino representan fuentes permanentes de contaminación, sin embargo estos contaminantes como son los hidrocarburos fósiles y el gas metano, representan productos biogénicos que pueden ser empleados en el metabolismo de bacterias hidrocarbonoclasticas y metanogénicas, a través de mecanismos quimiosintéticos.

Al final, Soto *et al.* (2004) concluyen que en el sector suroeste del Golfo de México, se observa una considerable contaminación superficial debido a la actividad petrolera en las últimas tres décadas. Es por esto que la vigilancia de los efectos de la contaminación antropogénica en el medio marino constituye un tema prioritario de investigación. Sumado a lo anterior se infiere que en México, hay pocos estudios referentes a la detección, seguimiento y vigilancia de contaminación superficial por hidrocarburos específicamente en la Sonda de Campeche, y en la zona suroeste del Golfo de México.

Las siguientes figuras referidas a continuación serán la imagen “e”. En la figura 20, una tercer chapopotera fue detectada, como menciona Soto *et al.* (2004), en el área suroeste del Golfo de México, es común la presencia de contaminación superficial por hidrocarburos (petróleo), causadas por emanaciones naturales. Como último dato en la imagen “j”, se observan de dos filamentos de petróleo causados, de acuerdo con su firma en la imagen SAR, por barcos o buques que transportan este producto, aunque de igual manera las actividades de limpieza pueden ser motivo a considerar, ya que estas de igual manera pueden causar filamentos.

Reiteradamente Fu y Holt en 1982(b), muestran dos imágenes de derrames causados por barcos, la primera tomada el 19 de septiembre de 1978, donde un barco que causó un filamento de 30 kilómetros, cerca de la Bahía de Delaware; la segunda, donde se muestran dos barcos y filamentos que fueron convertidos en manchas, ya que fueron dispersados por el viento.

En las imágenes del 13 de octubre, en las dos primeras imágenes de la serie que son la “k” y “l” se detectaron 9 filamentos de petróleo y 3 barcos, las primeras 5 en la imagen “k” junto con los 3 barcos y las 4 restantes en la imagen “l”. Igual que Fu y Holt (1982b), Alpers y Espedal (2004) abordan este tipo de derrames mostrando diferentes imágenes referentes a la contaminación superficial causada por barcos. En una de ellas efectivamente ilustra cómo un barco deja una línea negra u oscura (bajos niveles de retrodispersión) de aproximadamente 80 km; la imagen fue tomada o adquirida por el ERS-1, el 20 de mayo de 1994 al este de Taiwán. Además argumentan que el viento acumula los componentes más pesados en el lado del sotavento, y lo ilustran en una imagen del océano Índico tomada por el ERS-2 el 6 de abril de 1999 (Alpers y Espedal, 2004).

En la imagen “o” y “p” del 14 de octubre, se observa contaminación superficial causada, en primer lugar, por alguna fuga o actividad de limpieza en los barcos tanque visibles alrededor de Cayo Arcas, en la imagen “o”, y en segundo lugar, en la imagen “p” por la actividad petrolera en la Sonda de Campeche. Es de resaltar el gran tamaño de los barcos tanque (200 m eslora), lo cual les imposibilita navegar en la Sonda de Campeche, razón por la cual el punto de exportación

(Cayo Arcas), se encuentra tan alejado de la zona de las plataformas petroleras, para así prevenir accidentes, en la Sonda de Campeche.

Como último punto en el tópico detección de manchas de petróleo o hidrocarburos, tanto chapopoterías como causadas por la actividad petrolera, podemos mencionar la notable diferencia entre métodos usados por diferentes autores. En el caso de estudio, se utilizaron bandas y mapas virtuales, para la detección de estas manchas. Pero la mejor herramienta fue, el filtro de radar "std\_dev\_1.6.ker" proporcionado por el programa ERMapper, el cual como se mencionó en la metodología aplica un arreglo Gaussiano, con una desviación estándar de 0.625, lo cual elimina por completo el ruido Speckle, permitiendo un realizar un mejor análisis. Pero a pesar de su gran utilidad existe poca información referente al uso y aplicación de este programa en el tratamiento de imágenes SAR.

Obteniendo como resultado la correcta asignación e identificación de zonas oscuras o de bajos valores de retrodispersión, lo cual colabora los resultados obtenidos por los autores anteriormente nombrados, dentro del marco o tema de detección de manchas de petróleo, considerando que si en el caso de estudio se aplicarán el SVMs (González *et al.*, 2009) o el algoritmo de clasificador de texturas (Pellón de Miranda *et al.*, 2004), como resultado obtendríamos las manchas detectadas en esta tesis, encerradas en polígonos, ya que estos algoritmos clasifican y agrupan los números digitales o las capas de textura. Sin embargo, el uso de mapas virtuales proporcionados por el procesador Nest (MVN), fue algo novedoso la mayoría de las publicaciones hacen referencia a lugares o sitios por medio de mapas escalados, pero en esta tesis se les dio amplio uso, siendo de gran ayuda para la georeferenciación de las imágenes SAR, tanto para la localización de plataformas petroleras, barcos, ríos y sus desembocaduras. Lo cual contribuyo, para realizar comparaciones entre lo visto en la imagen SAR y lo real en los mapas virtuales. Algo mas que es relevante mencionar es que, en los estudios de asignación y detección de manchas de petróleo en el mar, el uso de diferentes sensores remotos es una técnica altamente efectiva para llevar a cabo un completo estudio.

En la imagen “q”, son visibles diferentes estructuras como zonas frontales con altos y bajos valores de retrodispersión, y zonas con bajos valores, en este punto es importante mencionar que el tema de zonas frontales fue discutido en párrafos anteriores. Así que nos centraremos en el porqué de las zonas con bajos valores de retrodispersión. Como se ha comentado y discutido, diferentes fenómenos causan firmas bastante semejantes en las imágenes SAR. Alpers y Melsheimer (2004), evidenciaron que la lluvia además de ser detectada por medio de celdas de lluvia, también es detectable por medio de zonas oscuras en las imágenes SAR. Sumado a lo anterior Clemente-Colón (2004), analiza el tipo de firma que posee una surgencia en las imágenes SAR, realizando comparaciones con imágenes de temperatura para una mejor descripción.

Las firmas causadas por surgencias son casi idénticas a las causadas por lluvia, es por lo cual es altamente recomendable el uso de diferentes sensores como activos y pasivos. Clemente-Colón (2004) muestra varias imágenes, dentro de las cuales se puede mencionar la del 23 de julio de 1994, del ERS-1, en la costa norte de Taiwán, donde la causa aparente de la zona con baja retrodispersión es una surgencia inducida por la interacción de la corriente de Kuroshio y la batimetría de la costa. Por lo tanto, dada la gran actividad pesquera en la Laguna de Términos (Beach *et al.*, 2005), en el caso de estudio las zonas oscuras, en la zona oceánica de la subimagen (Fig. 51) de la imagen “q”, pueden ser presuntamente atribuibles a una posible surgencia.

Por último el cálculo del coeficiente normalizado de backscattering  $\sigma^0$  realizado en el presente trabajo, lo considero algo igualmente novedoso como mencioné en el uso de mapas virtuales, ya que en la bibliografía disponible no se profundiza este tema y la mayoría de los documentos hacen referencia mayormente a los procedimientos de calibración del SAR.

De acuerdo a la bibliografía, el cálculo de  $\sigma^0$  ha sido usado para pruebas de saturación del ADC (Convertidor Analógico o Análogo/Digital) del ERS-1 y 2, realizado por Laur *et al.* (1993), y para derivar niveles de inundabilidad en el río Paraná en Argentina en un estudio conducido por Frulla *et al.* (1998).

Más actualmente, en el 2002 la Agencia Espacial Japonesa anunció un método para realizar una calibración absoluta de productos SAR.PRI del JERS generados por la ESA, utilizando una escena de bosque tropical del Amazonas y suponiendo un  $\sigma^0$  de -7.74 dB para *las plantas*, esto llevado a cabo en simuladores, no sustancialmente en imágenes SAR.PRI, y así se puede nombrar varios estudios involucrados en pruebas, calibraciones y otros tópicos, pero en cuanto al cálculo de este coeficiente en manchas de petróleo, existe una mínima disponibilidad de literatura o bibliografía en la que se haga referencia a este tema.

## IX CONCLUSIONES

1. Se obtuvo información de fenómenos oceanográficos y atmosféricos, a pesar de las condiciones adversas de la región, en la época de estudio.
2. Resulta compleja la interpretación de las imágenes SAR, por lo que es importante contar con información de otros sensores.
3. La presencia de manchas de petróleo en la Sonda de Campeche, fue menor a la esperada, lo cual nos indica que al menos en el periodo de estudio, no se presentaron importantes derrames causados por la explotación petrolera.
4. Los campos de viento han sido fundamentales para poder detectar los fenómenos observados por el radar, como oceanográficos y atmosféricos.
5. Los valores de  $\sigma^0$  (Coeficiente Normalizado de Backscattering), en manchas naturales, fueron en su mayoría mucho más elevados (Ejemplo - 22.15 dB) que los obtenidos de las manchas ocasionadas por la actividad petrolera (Ejemplo -16.30 dB).
6. En los esfuerzos de viento no se detectaron valores de  $\sigma^0$  (Coeficiente Normalizado de Backscattering), mayores a -8 dB, pero se encontraron valores positivos debido a números digitales mayores a mil, en las Celdas de lluvia no se detectaron valores mayores a -10 dB, ya que los números digitales fueron igual o mayores a 200.

## **X RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS**

Es necesaria una mayor comunicación y transparencia entre los diferentes centros de ciencias de nuestro país, para una mayor retroalimentación del conocimiento y de los propios recursos, lo cual reforzará la formación de mejores recursos humanos.

Si se refuerza la comunicación entre los centros y se hacen las gestiones correspondientes, se espera que CONAYT impulse y apoye la formación de REDES de investigación, las cuales podrán lograr adquirir mejores recursos y apoyos económicos, ya sea para la adquisición de imágenes de satélite o para la realización de cruceros oceanográficos.

En cuanto al tema de adquisición de imágenes de satélite, hago énfasis en la gran utilidad de las imágenes de radar (SAR o ASAR), por lo tanto es necesario elaborar convenios con las diferentes agencias espaciales, para promover una mayor distribución de este recurso, el cual es altamente costoso, e inclusive, proponer a la Agencia Espacial Mexicana que vaya planeando, a un mediano plazo, contar con este tipo de sensores activos y pasivos.

Por último, es necesaria la constante capacitación tanto del personal docente como del alumnado, en programas de software especializados relacionados con los temas de tesis o doctorado, ya que sin dicha capacitación es extremadamente difícil la culminación satisfactoria de los proyectos.

## **XI SITIOS WEB RELACIONADOS CON EL TEMA Y BIBLIOGRAFÍA**

[http://www.esa.int/esaMI/Eduspace\\_ES/SEMZQYD3GXF\\_0.html](http://www.esa.int/esaMI/Eduspace_ES/SEMZQYD3GXF_0.html)

<http://science.nasa.gov/missions/tiros/>

\*CCRS/NRCAN@ "Canada Centre for Remote Sensing Natural Resources Canada".

\*[http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter3/01\\_e.php](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter3/01_e.php)

\*CRISP@ "Center for Remote Imaging Sensing & Processing".

\*<http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/ers.htm>

[www.scp.byu.edu](http://www.scp.byu.edu)

\*Introducción al sensoramiento remoto del océano, pagina 92, Gabriel Yuras

\*<http://www.dgeo.udec.cl/yuras/tutoriales/>

<http://winds.jpl.nasa.gov>

<http://www.dgeo.udec.cl/yuras/tutoriales/>

<http://podaac.jpl.nasa.gov/>

<http://winds.jpl.nasa.gov/aboutScat/index.cfm>

<http://earth.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=1477>

[http://www.hdfgroup.org/products/hdf4\\_tools/](http://www.hdfgroup.org/products/hdf4_tools/)

<ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/quikscat/L3/jpl/hdf/1999/>

<http://poet.jpl.nasa.gov/>

\*esa@

\*<http://earth.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=5895>

\*[https://earth.esa.int/web/guest/missions/content?p\\_r\\_p\\_564233524\\_assetIdentifier=ers-sar-tropical-oceanic-phenomena-5887](https://earth.esa.int/web/guest/missions/content?p_r_p_564233524_assetIdentifier=ers-sar-tropical-oceanic-phenomena-5887)

\*cstars@

\*[http://www.cstars.miami.edu/index.php/cstars-](http://www.cstars.miami.edu/index.php/cstars-projects/deepwaterhorizon/deepwater-horizon/bpdwh-arch1.html)

[projects/deepwaterhorizon/deepwater-horizon/bpdwh-arch1.html](http://www.cstars.miami.edu/index.php/cstars-projects/deepwaterhorizon/deepwater-horizon/bpdwh-arch1.html)

<http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1991-2/articulo387.html>

<http://www.sct.gob.mx/fileadmin/CGPMM/biblioteca/ecologia/308.pdf>

<http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1991-2/articulo387.html>

- Agencia Espacial Japonesa. 2002. *JERS SAR PRI Products Calibration*. EMCF-JERS-EOAD-TN-01-0005. ESRIN. Edition 2. 03-27.
- Aguirre-Gómez R. 2002. *Los Mares Mexicanos a través de la Percepción Remota*. Ed. UNAM-Plaza & Valdez. México. 85-93 p.
- Alpers W. & B. Brümmer. 1994. Atmospheric boundary layer rolls observed by the synthetic aperture radar aboard the ERS-1 satellite. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, 12 613–12 621.
- Alpers Werner & Heidi A. Espedal. 2004. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*. Washington, DC. Editors Christopher R. Jackson & John R. Apel, 265-266-270 p.
- Alpers Werner & Melsheimer Christian. 2004. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*. Washington, DC. Editors Christopher R. Jackson & John R. Apel, 355 p.
- Apel J. R. 2000. Solitons near Gibraltar: Views from the European Remote Sensing. *Global Ocean Associates*, 23 p.
- Arriaga R., Evelia & Gladys B., Souza. 2006. El Gran Ecosistema Marino de Golfo de México: Perspectivas para su Manejo. Centro/Instituto EPOMEX-UAC "Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México Universidad Autónoma de Campeche. *JAINA Boletín Informativo*, Vol 16 (1).
- Babin S. M., Todd D. Sikora & N. S. Winstead. 2003. A case study of satellite synthetic aperture radar signatures of spatially evolving atmospheric convection over the western Atlantic Ocean. *Boundary-Layer Meteorol*, Vol. 106, 527-546.



- Barnett T., P. Kelly & B. Holt. 1989. Estimation of the two dimensional ocean current shear field with a synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, 16 087-16 095.
- Beach L. C., Calderon R., Cepeda M. F., O. Autumn, O. Stephen & Robadue D. 2005. Resumen del Perfil de Primer Nivel del Sitio Laguna de Términos y su Cuenca, México Narragansett, *RI: Costal Resources Center*, University of Rhode Island.
- Beal R. C., D. G. Tilley & F. M. Monaldo. 1983. Large- and small-scale spatial evolution of digitally processed ocean surface wave spectra from the Seasat synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, 1761-1778.
- Beal R. C., P. S. DeLeonibus & I. Katz. 1981. *Spaceborne Synthetic Aperture Radar for Oceanography*. Johns Hopkins University Press. Baltimore, Maryland. 215 p.
- Beal R. C., T. W. Gerling, D. E. Irvine, F. M. Monaldo, & D. G. Tilley, 1986: Spectral variations of ocean wave directional spectra from the Seasat synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, 2433–2449.
- Beal R. C., V. N. Kudryavtsev, D. R. Thompson, S. A. Grodsky, D. G. Tilley, V. A. Dulov, & H. C. Graber. 1997. The influence of the marine atmospheric boundary layer on ERS-1 synthetic aperture radar imagery of the Gulf Stream. *Journal of Geophysical Research*, Vol 102, 5799-5814.
- Beal R., C. 1980. Spaceborne imaging radar: Ocean surface wave monitoring. *Science*, Vol. 208, 1371-1375.

- Behringer D. W., R. L. Molinari & J. F. Festa. 1977. The variability of anticyclonic current patterns in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82. No. 34: 5469-5476.
- Brown R. A. 1990. Surface fluxes and remote sensing of air-sea interactions: Current Theory. Ed. G. L. Geemaert and W. J. Plant, Vol. 1, Surface Waves and Fluxes, Kluwer Academic, 7-28 p.
- Carreño F. & M. A. Antón. 2001. Óptica Física. Problemas y ejercicios resueltos. *Prentice Hall*, Madrid. ISBN: 84-205-3181-2.
- Chakraborty M. Panygrahy & S. A. Sharma. 1997. Discrimination of rice crop grown under different cultural practices using temporal ERS-1 synthetic aperture radar data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 52:183-191.
- Chiuvieco E. 2002. *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Ed. Ariel Ciencia. Barcelona, España, 592 p.
- Clemente-Colón P. & X. H. Yan. 2000. Low backscatter features in SAR imagery, *Johns Hopkins APL Technical Digest*, January-March, 21(1), 116-121.
- Clemente-Colón Pablo. 2004. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*. Washington, DC. Editors Christopher R. Jackson & John R. Apel, 221-242p.
- Cochrane J. D. 1963. *Yucatan Channel. Annual report*. Department of Oceanography, Texas A&M University. Ref. 63-18A, 6-11 p.
- Cruz-Ábrego F., Marina, Flores-Andolais Felipe & Solís-Weiss Vivianne. 1992. Distribución de moluscos y caracterización ambiental en zonas de descarga

de aguas continentales del Golfo De México.  
<http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/19912/articulo394.html>.

Díaz de León Asdrúbal Martínez. 2001. Patrones de Circulación en la Capa Superior del Océano en la Parte Norte del Golfo de California, expresados en imágenes del Radar de Apertura Sintética del ERS-2. *Ciencias Marinas*, 27(2): 209-221.

Elachi C. & J. R. Apel. 1976. Internal Wave Observations Made with an Airbone Synthetic Aperture Radar. *Geophysical Research Letters*, Vol. 3, 647-650.

Espedal H. A. & O. M. Johannessen. 2000. Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR). *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, 3561-3566.

Font Jordi, S. Rousseau, B. Shirasago, E. García-Górriz & R. L. Haney. 2002. Mesoscale variability in the Alboran Sea: Synthetic aperture radar imaging of frontal eddies. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, 3059, doi:10.1029/2001JC000835.

Foro Regional Internacional. 2010. Evaluación y manejo integral del gran ecosistema marino del golfo de México. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). Blvd. Adolfo Ruiz Cortines 4209 3er Piso Ala "A", Del. Tlalpan, 14210, México D.F.

Frost V. S., Stiles J. A., Shanmugan K. S. & Holtzman J. C. 1982. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-4, nº2.

- Frulla L. A., Jorge A. M., K. Haydee & Patricia K. 1998. Metodología de pre-procesamiento y procesamiento utilizadas en el tratamiento cuantitativos de datos SAR para el estudio de ambientes en el Bajo Delta del Río Paraná, Argentina. Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE. p. 1075-1086.
- Fu L. & B. Holt. 1982: Seasat Views Ocean and Sea Ice with Synthetic Aperture Radar, *NASA/JPL Publication 81-120*, Feb. 15, 200 p.
- Fu Lee-Lueng & Benjamin Holt. 1982. Seasat views oceans and Sea Ice with Synthetic-Aperture Radar. National Aeronautics and Space Administration (NASA) Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, California. NASA Jet Propulsion Laboratory Publication 81-120. 108(a), 116-117(b), 76-78(c), 106(d).
- Gade M. & W. Alpers. 1999. Using ERS-2 SAR for routine observation of marine pollution in European coastal waters. *The Science of the Total Environment*, Vol. 237/238, 441-448.
- Gambini María Juliana. 2006. *Modelos de Segmentación basados en Regiones y Contornos Activos aplicados a Imágenes de Radar de Apertura Sintética*. Tesis de Doctorado. Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Computación, Buenos Aires, 172 p.
- Gandía S. & J. Meliá. 1995. *La Teledetección en Seguimiento de Fenómenos Naturales. Microondas*. Publicacions de la Universitat de València, 288 p.
- García R. C., González, R. de la Vega, A. Valverde & E. Sebem. 2003. Teledetección y Desarrollo Regional. X Congreso de Teledetección. Cáceres, España, 325-328.

- García-Álvarez. 2003. *Procesamiento y aplicación de datos de satélite para el análisis de fenómenos marinos en el Golfo de California*. Tesis de Licenciatura, Tecnológico de La Paz, B. C. S., 75 p.
- González F. I. & Coauthors. 1980. Seasat synthetic aperture radar: Ocean surface wave detection capabilities. *Science*, Vol. 204, 1418-1421.
- González L., J. M. Torres, N. Yarovenko & J. Martín. 2009. Discriminación automática de vertidos de hidrocarburos a partir de imágenes ASAR utilizando una máquina de vectores de soporte (SVM). Laboratorio de Teledetección y SIG, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Vigo Facultad de Ciencias del Mar, Campus Lagoas-Cuadrosende. *XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección Calatayud*, 23-26 de septiembre, 537.540.
- Gower J. F. R. 1994. Mapping coastal currents with SAR, using naturally-occurring surface slick patterns. *Proc. Second ERS-1 Symp., Hamburg, Germany, ESA*. Publ. SP-361, 415-418.
- Green T. J., F. S. Marcus & B. D. Colella. 1995. "Synthetic aperture-radar imaging with a solid-state laser", *Applied Optics*, Vol. 34, 6941-6949.
- Henderson F. M. & Lewis A. J. 1998. *Manual of remote sensing. Volume 2. Principles and applications of imaging radar*. 3rd Edition. John Wiley and Sons Inc. Published in cooperation with the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. USA. 866 p.
- Houze R. A. Jr. 1997. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox? *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 78, 2179–2196.

INEGI. 2010. Información Geográfica. En: <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/español/datosgeogra>.

INEGI. 2011. Información Geográfica. En: <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/español/datosgeogra>.

Johannessen J. A., Roed L. P. & Wahl T. (1993). Eddies detected in ERS-1 ASR images and simulated in reduced gravity model. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14: 2203–2213.

Johannessen J. A., R. A. Shuchman, G. Digranes, D. Lyzenga, C. Wackerman, O. M. Johannessen & P. W. Vachon, 1996. Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS-1 SAR. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, 6651–6668.

Korteweg D. J. & G. de Vries. 1895. “On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary wave”. *Philosophical Magazine*, Vol. 39, Series 5, 422–443.

Kuettner J. P. 1971. Cloud Bands in the Earth’s Atmosphere: Observations and Theory, *Tellus*, Vol. 23, 404-425.

Lankford, R. R. 1977. *Coastal lagoons of Mexico: Their origin and classification*. In M. Wiley (Ed.) *Estuarine Processes*. Academic, New York. 215 p.

Laur H., Bally P., Meadows P., Sánchez J., Schaettler B. & Lopinto E. 1996. ERS SAR calibration. Derivation of the backscattering coefficient  $\sigma^0$  in ESA ERS SAR PRI products. ESA Doc. Nº: ES-TN-RS-PM-HL09, *Issue 2*, Rev.2.

Laur H., P. Meadows, J. I. Sánchez & E. Dwyer. 1993. *ERS-1 SAR radiometric calibration. Proceedings of SAR Calibration Workshop: CEOS Calibration*

- Working Group SAR Calibration Sub-Group*, September 20-24, ESTEC/ESA, Noordwijk. The Netherlands, 257-281.
- Lavín M. F., Durazo R., Palacios E., Argote M. L. & Carrillo, L. 1997. Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27 (10): 2298-2305.
- Lean G., & D., Hinrichen. 1999. WWF Atlas of the Environment. *Helicon Publishing*, 192.
- Lee J-S. 1981. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 17:24-32.
- Leipper D. F. 1970. A sequence of current patterns in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* M. 75: 637-357.
- LeMone M. A. 1973. The Structure and Dynamics of Horizontal Roll Vórtices in the Planetary Boundary Layer, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 30, 1077-1091.
- Lopes A., Nezry E., Touzi R. & Laur H. 1990. Maximum a posteriori Speckle filtering and first order texture models in SAR images. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1990. IGARSS '90. 'Remote Sensing Science for the Nineties', 10th Annual International.
- Lu J., H. Lim S., C. Liew, M. Bao & L. K. Kwoh. 1999. Statistics in Southeast Asian waters compiled from ERS synthetic aperture radar imagery. *Earth Observation Quart*, Vol. 621, 13-17.
- Lu J., L. K., Kwoh, H. Lim, S., C. Liew, & M Bao. 2000. Mapping oil pollution from space. *Backscatter*, Vol. 11, 23-26.

- Lyzenga D. R. & G. O. Marmorino. 1998. Measurement of surface currents using sequential synthetic aperture radar images of slick patterns near the edge of the Gulf Stream. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, 18 769-18 777.
- Lyzenga D. R. & N. P. Malinas. 1994. *Airbone radar measurements of coastal ocean currents and waves*. Proc. 2nd Thematic Conf. on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, New Orleans, LA, ERIM, 388 p.
- Lyzenga D. R. 1991. Interaction of short surface and Electromagnetic Waves Ocean fronts, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No., 10 765-10 768.
- Lyzenga D. R. 1998. Effects of intermediate-scale waves on radar signatures of ocean fronts and internal waves. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No 18 759-18 768.
- Lyzenga David R., George O. Marmorino & Johnny A. Johannessen. 2004. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*. Washington, DC. Editors Christopher R. Jackson & John R. Apel, 207 p.
- Mancilla P., M. y M. Vargas F., 1978. Estudios sobre el flujo neto de agua a través de la laguna de Términos, Campeche. Resúmenes del VI Congreso Nacional de Oceanografía, 131 p.
- Mastenbroek K. 1996. "*Wind-wave interaction*" PhD thesis at the Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 119 p.
- Maul G. A. 1977. The annual cycle of the Gulf Loop Current, Part I: Observations during a one-year time series, *Journal of Marine Research*, Vol. 35, 29-47.



- Mied A. L. Cooper, G. J. Lindemann & M. A. Sletten. 2002. Wave propagation along freely propagating surface gravity currents fronts. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Vol. 36, 59-81.
- Molinari R., L. Festa & D. W. Behringer. 1978. The circulation in the Gulf of Mexico derived from estimated dynamic height fields. *Journal of Physical Oceanography*, 8 :(6), 987-996.
- Monreal-Gómez M. A. & D. A. Salas-de-León. 1990. Simulación de la Circulación de la Bahía de Campeche. *Geophysical Internacional*, 29(2): 101-111.
- Monreal-Gómez M. A. & D. A. Salas-de-León. 1997. *Mareas y circulación residual en el Golfo de México*. In: Monografía No. 3 "Oceanografía Física en México", ed. Unión Geofísica Mexicana, México. 223 p.
- Nagao M & T. Matsuyama. 1978. Edge preserving smoothing. *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 9: 394-407.
- Nehring R. 1978. *Ciencia y desarrollo, campos petroleros gigantes y recursos mundiales de petróleo*. CONACyT. 1978. 199 p.
- Nowlin W. D. Jr. & J. M. Hubertz. 1972. Constrasting summer circulation patterns for the eastern Gulf-Loop Current versus Anticyclonic Ring. In: L.R.A. Capurro and J. L. O. Reids (Ed.), *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*, Vol. 2 Gulf Publishing, and Houston.119-138 p.
- Ochadlick A. R., P. Cho & J., Evans-Morgis. 1992. Synthetic Aperture Radar Observations Of Currents Colocated With Slicks. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, 5325-5330.

- Ochoa J., H. Sheinbaum, A. Badan, J. Candela & D. Wilson, 2001. Geostrophy via potential vorticity inversion in the Yucatan Channel. *Journal of Marine Research*, 59, 725-747 p.
- Oliver C. & S. Quegan. 1998. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*. Artech House, Boston. 465 p.
- Paudyal D. R., Aschbacher J. 1993a. Evaluation and performance test of selected SAR speckle filters. Proc. Intl. Symp. On *Operationalization of Remote Sensing*. ITC. Enschede. The Netherlands. 5: 89-96.
- Paudyal D. R., Aschbacher, J. 1993b. Land cover separability studies of filtered ERS-1/SAR images in the tropics. Proc. IGARSS'93, Tokyo, Japan, 1216-1218.
- Pavlakakis P., D. Tarchi, & A. J. Sieber. 2001. On the monitoring of illicit vessel discharges using Spaceborne SAR remote sensing-A reconnaissance study in the Mediterranean Sea. *Annals of Telecommunications*, Vol. 56, 700-718.
- Pedersen J., L. Saljely, G. D. Strem, O. Follum, J. Andersen, T. Wahl & A. Skoelv. 1996. Oil spill detection by use of ERS SAR data: From research and development towards preoperational early warning detection service. *Proc. Second ERS Applicattion Workshop*, London, United Kingdom, ESA, Publ. SP-383, 181-185.
- Pellón de Miranda F., M. Q. M. Arturo, C. P. Enrico, H. B. Carlos, W. Pamela & M. M. Luis. 2004. Analysis of RADARSAT-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of Mexico, using the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC). *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 3, 424–436.

Programa Sectorial de Energía. 2006. Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006. Vicente Fox Quesada, Presidente Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. Secretaria de Energía. 162 p.

Reintjes Francis J. & Godfrey Coate T. 1952. *Principles of Radar, MIT Radar School Staff*. 3ª Ed. McGraw-Hill Book Co. Inc. 218 p.

Russell J. S. 1838. Report to committee on waves. Report of the 7th Meeting of the British Association for the Advancement of Science, Liverpool, United Kingdom, *British Association for Advancement of Science*, 417-496.

Russell J. S. 1844. Report waves. Report of the 14th Meeting of the British Association for the Advancement of Science, York, United Kingdom, *British Association for Advancement of Science*, 311-390.

Salas-de-León D. A. & M. A. Monreal-Gómez. 2004. Anticyclonic-cyclonic eddies and their impact on near-surface chlorophyll stocks and oxygen supersaturation over the Campeche Canyon, Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, C05012, doi: 10.1029/2002JC001614.

Sánchez L. F. de Jesús. 2011. *Aplicación de sensores activos y pasivos en la circulación superficial de mesoescala en la parte sur del Golfo de México (Bahía de Campeche)*. Tesis de maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional (CICIMAR-IPN), 97 p.

Sheinbaum J., J. Candela, A. Badan & J. Ochoa. 2002. Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*, 29, 10-1 to 10-4.

- Sheres D. 1982. Remote synoptic surface current measurements by gravity waves: A method and its test in a small body of water. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 12, 200-207.
- Shirasago B. 1991. *Hidrografía y análisis frontogenetico en el sur de la Bahía de Campeche*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 130 p.
- Shirasago B. 1996. *Aplicación del Radar de Apertura Sintética (SAR) del satélite ERS-1 al estudio de la dinámica superficial de mesoescala en el Mediterráneo Occidental*. Tesis de doctorado. Universidad Barcelona. 252p.
- Signoret Martha, J. Aldeco & M. Teresa Barreiro. 2006. Variabilidad de perfiles de clorofila a obtenidos por fluorescencia natural en el oeste y centro del Golfo de México en junio de 1999. *Departamento el Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. Hidrobiológica*, 16 (3):221-232.
- Sikora Todd D. & Susanne Ufermann. 2004. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*. Washington, DC. Editors Christopher R. Jackson & John R. Apel, 321 p.
- Simpson J. H. e I. D. James. 1986. *Coastal and Estuarine Sciences 3. Baroclinic Processes on Continental Shelves. Coastal and estuarine fronts 1986*. In: C.N Mooers (Ed.). American Geophysical Union Washington, D.C. 130p.
- Soto L. A., S. Sánchez-García & D. López-Veneroni. 2004. Ambientes influidos por emanaciones naturales de hidrocarburos y gas en el suroeste del Golfo de México. (LAS) Laboratorio de Ecología del Bentos ICMYL, UNAM, México. (SSG) Instituto de Química, UNAM, (DLV) Instituto Mexicano del Petróleo. [www.ujat.mx/publicaciones/uciencia](http://www.ujat.mx/publicaciones/uciencia), Número Especial I: 51-58.

- Steinberg B. D. 1976. *Principles of Aperture and Array System Design*. John Wiley and Sons, New York. Cap., 1.
- Sturges W. 1993. The annual cycle of the western boundary current in the Gulf of Mexico, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98: 10, 18.053.18.068.
- Sturges W. A., Lugo-Fernández & M. D., Shargel. 2005. Circulation in the Gulf of Mexico: observations and models. *American Geophysical Union*. Florida Avenue, N. W., Washington. 347 p.
- Vázquez de la Cerda A. M. 1993. *Bay of Campeche Cyclone*. Tesis de doctorado. Texas A&M, University. 91 p.
- Wackerman Christopher C. & Pablo Clemente-Colón. 2004. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*. Washington, DC. Editors Christopher R. Jackson & John R. Apel, 175 p.
- Wismann M. W., G. Alpers & H. Hühnerfuss. 1998. Radar signatures of marine mineral oil spills measured by and airborne multi-frequency radar. *International Journal of Remote Sensing*, 19:3607-3623.
- Woodcock A. 1941. Soaring Over the Open Sea, *The Scientific Monthly*, Vol. 25, 226-232.
- Wooding M. G., Attema E., Aschbacher, J. Borgeaud M Cordey R.A., De Groof H., Harms J., Lichtenegger J., Nieuwenhuis G., Schmullius & C., Zmunda A.D. 1995. Satellite radar in agriculture. Experience with ERS-1. European.

- Wu J. 1991. Effects of Atmospheric stability on ocean ripples: A comparison between optical and microwave measurements. *Journal of Geophysical Research*, Vol 96, 7265-7269.
- Yáñez-Arancibia A. & J. Day. 2004. The Gulf of Mexico: Towards an integration of coastal management and large marine ecosystem management. *Ocean & Coastal Management*. 47: 537–563.
- Yáñez-Arancibia A. & P., Sánchez-Gil. 1988. *Ecología de los Ecosistemas Costeros del Sur del Golfo de México: La Región de la Laguna de Términos. Caracterización Ambiental de la Sonda de Campeche frente a la Laguna de Términos*. (Ed). Instituto Ciencias del Mar y Limnol. UNAM. Coastal Ecol. Inst., L.S.U. Editorial Universitaria D.F. México.
- Zavala-Hidalgo J., Steven. L. Morey & James J. O'Brien. 2003a. Cyclonic eddies northeast of the Campeche Bank from altimetry data, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 33, 623– 629.
- Zavala-Hidalgo J., Steven L. Morey & James J. O'Brien. 2003b. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. C12, 3389, doi: 10.1029/2003JC001879.

## **XII ANEXOS**

### **Anexo A.**

#### **A.1 El Satélite de Sensoramiento Remoto Europeo 2 (ERS-2 “European Remote Sensing Satellite 2”).**

Los satélites ERS-1 y 2, son utilizados para adquirir mediciones de viento (baja resolución 50 Km), el estado superficial del mar y monitoreo de glaciares, entre otra infinidad de aplicaciones que se abordaran más adelante en capítulos posteriores. ERS-1 fue lanzado en julio de 1991, cuenta en su carga útil con un radar de apertura sintética (SAR), el cual es usado para obtener imágenes de los océanos de la tierra y para el seguimiento de hielos marinos, como sensor activo es independiente de la luz solar y de las condiciones climatológicas. Los demás instrumentos a bordo de este satélite son instrumentos de microondas que miden el estado del mar (los vientos en la superficie del mar, monitorea la circulación oceánica, temperatura superficial con el sensor ASTR).

Posee una órbita cuasi polar sincronizada con el sol lo cual le permite adquirir una visión global de todo el mundo, con coberturas geográficas repetitivas. El ERS-2 lanzado en abril de 1995 (Fig. 67), es prácticamente idéntico al ERS-1, solo que a este último se le incorporo el sensor GOME, el cual tiene como misión la vigilancia del ozono, las órbitas de los satélites ERS-1 y 2 son tales que el ERS-2 sigue la misma ruta de tierra que el ERS-1, a excepción de un retraso de un día, esto permite a los científicos tener oportunidad de adquirir datos de interferometría en tándem de un área usando el radar de apertura sintética de los dos satélites, ya que los datos tándem tienen mejores propiedades de coherencia de los datos obtenidos a partir de 35 días a partir del paso de un solo satélite.

La misión tándem estaba en funcionamiento desde abril-junio de 1996, después del lanzamiento del ERS-2. El ERS-1 ha sobrevivido su vida útil prevista, y fue desactivado después de la misión conjunta, por lo tanto actualmente sólo el ERS-2 sigue en funcionamiento, contado con las siguientes características:

- A. Órbita sincronizada con el sol.
- B. Altitud de 782 kilómetros.
- C. Inclinación de 98.5 grados.
- D. Periodo orbital de 100 a 120 minutos; un periodo de repetición de ciclo de 35 días.

A continuación se en listan de manera los sensores a bordo del ERS-2.

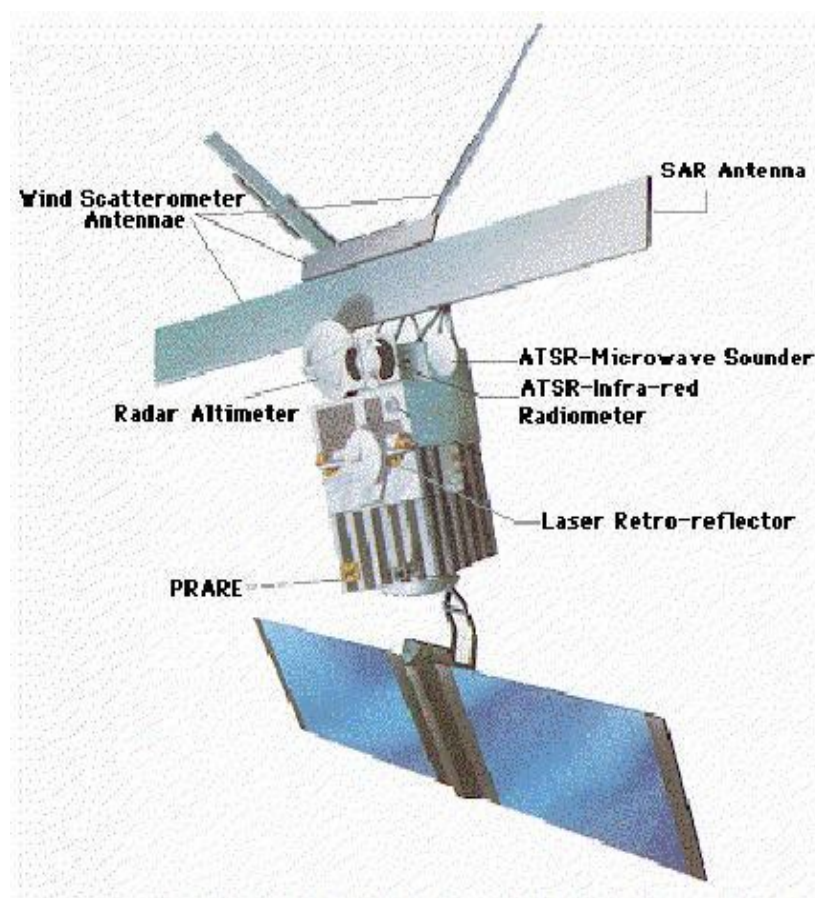
## **A.2 Sensores.**

AMI (instrumento de microondas activo): El funcionamiento del AMI, combina las funciones de un radar de apertura sintética (SAR) y un escaterómetro de viento (SNB) a través de su sistema de cuatro antenas (tres para el escaterómetro y una para el SAR). La superficie de la Tierra es iluminada por la señal emitida por el instrumento y la energía dispersada (backscattering) es recibida para producir los datos de campos de viento, espectros de olas (modo WNS), e imágenes de alta resolución (modo SAR) de la superficie de la Tierra. La antena posee un tamaño de 10 x 1 m y por medio de la apertura sintética, el swath (campo de barrido) es de 100 kilómetros.

RA-1 (Radar Altimetro): El altímetro de radar mide las variaciones de altura del satélite por encima del nivel del mar. ATSR (Along Track Scanning Radiometer): Este instrumento pasivo monitorea la emisión térmica de la superficie del mar.

GOME (Global Ozone Monitoring Experiment): El GOME es un espectrómetro pasivo, que se usa para la vigilancia del contenido de ozono en la atmosfera (CRISP@) (Tabla 7).





**Figura 69.** Satélite ERS-2 carga útil dispositivos activos (AMI “Active Microwave Instrument”) y pasivos.

**Tabla 7.** Características generales del SAR.

|                          |                                           |
|--------------------------|-------------------------------------------|
| Frecuencia               | 5.3 GHz (banda C)                         |
| Polarización             | Lineal VV                                 |
| Ancho de banda           | 15.55 MHz                                 |
| Pico de potencia         | 4.8 kw                                    |
| Tamaño de la antena      | 10 m x 1 m                                |
| Ángulo de incidencia     | 23 grados                                 |
| Swath o Campo de barrido | 100 kilómetros                            |
| Resolución               | 10 metros (puede variar según el cliente) |

### **A.3 Principios del Radar de Apertura Sintética (SAR).**

El SEASAT, fue el primer satélite civil que contaba con un SAR. Desde entonces, Canadá, Europa, Japón y Rusia (la antigua Unión Soviética) han puesto en órbita satélites los cuales llevan en su carga útil el SAR, para la investigación tanto del mar, como de la superficie terrestre.

Las operaciones del ERS-2, RADARSAT-1 y ENVISAT, son las misiones algunas de las misiones actualmente activas, lo cual significa que los datos SAR estará disponible al menos durante la próxima década en las siguientes bandas del espectro electromagnético en el rango de las microondas X (3 cm.), C (6 cm.), y L (24 cm.).

A partir de del lanzamiento del SEASAT en 1978, el Radar de Apertura Sintética (SAR), a bordo de satélites ha proporcionado una gran cantidad de información sobre fenómenos oceanográficos tan diversos como ondas superficiales, corrientes marinas, remolinos, frentes de viento, propagación de ondas internas, oleaje entre otros. Adicionalmente este tipo de sensores ha sido útil para determinar la topografía submarina somera, la influencia del hombre a través de instalaciones construidas fuera de la costa y otros eventos como los derrames de petróleo (Aguirre-Gómez, 2002).

El SAR fue desarrollado en la década de los 50's, pero su uso civil inicio en los 70's siendo montados en aeronaves para programas utilizando imágenes de radar (Gandía & Melía, 1995), pero está practica fue incapaz de proporcionar una amplia percepción global, tanto la cobertura temporal necesaria para observar muchos de los procesos oceánicos. De hecho, el SAR como sensor activo, es el instrumento útil para la detección de los fenómenos oceanográficos anteriormente mencionados, ya que es sensible a pequeños cambios de rugosidad de la superficie terrestre, en el orden de la longitud de onda del radar (desde 1 metro hasta varios centímetros), en el mar dicha rugosidad está definida por las ondas capilares creadas por el viento. También es independiente de la cobertura de nubes y no es influenciado por la energía solar.

Además, el SAR tiene la ventaja de proporcionar el control de factores tales como la energía, frecuencia, fase, la polarización, el ángulo de incidencia, resolución espacial y ancho del swath (área de barrido), los cuales son importantes en el diseño y operación de un sistema para la extracción de información cuantitativa.

Si bien cada sistema tiene su propia configuración, en términos de frecuencia, la polarización, resolución, ancho de barrido, etc., el concepto operativo subyacente para cada uno es lo mismo. Comenzando con una mirada histórica del desarrollo de la SAR, y la evolución de las estaciones espaciales.

Los conceptos detrás de funcionamiento del radar, de apertura real y sintética se presentan a continuación, junto con los factores y limitaciones que rigen el desempeño del SAR.

### **A.3 El Radar de Apertura Sintética (SAR).**

Como ya se esbozó anteriormente, el concepto de “apertura” está relacionado directamente con la antena del radar. La antena es un transductor que convierte señales eléctricas en electromagnéticas y viceversa, las primeras transmitiéndose mediante un conductor y las segundas en el aire o el vacío. La apertura de una antena está definida como el área efectiva de recepción o transmisión de una onda electromagnética, la cual depende directamente de las dimensiones de la antena y de la eficiencia de apertura (variable cuyo valor oscila entre 0 y 1) (Steinberg, 1979).

Un sistema SAR, tiene dos características que lo distinguen de otros sistemas de radar:

1. Crea una imagen en dos dimensiones, ya que cuenta con una plataforma para el sistema que se mueve en línea recta durante la recolección de datos (Azimut). La segunda dimensión se obtiene al medir el tiempo de retraso en el pulso recibido (Rango).

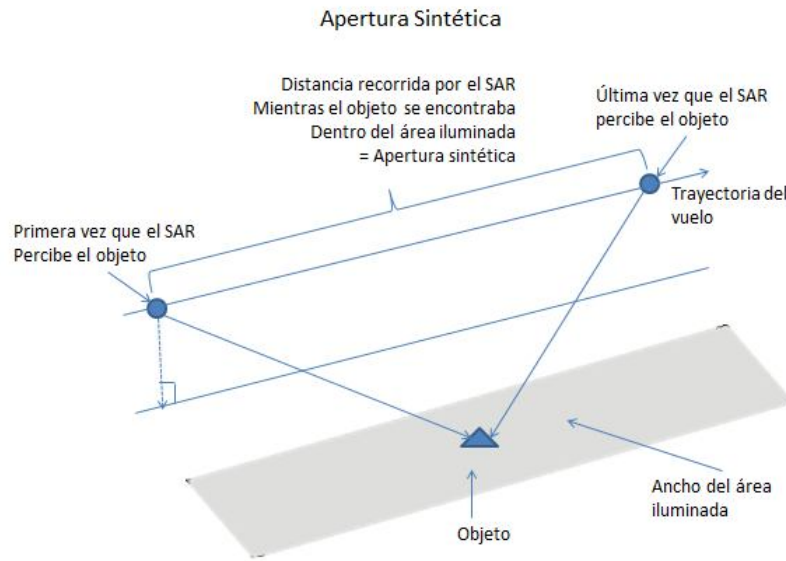
2. Obtiene resolución alta en la dirección del movimiento al enfocar o comprimir la energía asociada a un desplazamiento Doppler que surge por el movimiento de la plataforma.

Ya que el radar es un sistema coherente (se toma en cuenta la fase), es conveniente realizar el procesamiento de la señal utilizando números complejos (NC). También la frecuencia de repetición del pulso se mantiene baja para que el ancho del área iluminada pueda ser más amplio.

Por lo que se requieren NC, para el apropiado muestreo de la señal recibida. Una de las características que distingue a los sistemas de radar modernos de sus predecesores es el procesamiento digital de la señal (DSP).

Gracias al procesamiento digital, el enfoque puede ser preciso, y se mantiene una elevada calidad de la imagen. Una antena SAR transmite pulsos a la velocidad de la luz (300,000 km/s), el SAR a bordo de la plataforma espacial puede transmitir varios centenares de pulsos mientras la plataforma pasa sobre el objetivo a una velocidad de 27,000 km/h. Posteriormente, obtiene la señal de retorno (Backscattering) provenientes del objetivo, las cuales serán manipuladas y procesadas de tal manera que la imagen resultante se observa con mayor resolución espacial. La apertura sintética en este caso, se refiere a la distancia recorrida por la plataforma mientras el SAR recolecta información del objetivo.

El SAR del satélite ERS-1 envía 1,700 pulsos por segundo y recolecta mil respuestas provenientes de un solo objetivo, al sobrevolarlo (valores aproximados). La imagen procesada digitalmente tiene una resolución entre 10 y 30 m (depende del usuario), se estima que la plataforma espacial viaja 4 kilómetros mientras mantiene un objetivo “a la vista”, por lo tanto equivale a una antena estacionaria de 4 kilómetros de largo (Fig. 68).



**Figura 70.** Concepto de Apertura Sintética

#### A.4 Apertura Real del SAR.

La apertura real de un SAR es el intervalo de la distancia a lo largo de la dirección del alcance, equivalente al ancho del pulso transmitido, a partir del cual todas las señales regresan a la antena receptora en un mismo instante, y el problema a resolver es, como pueden estas señales ser identificadas, lo cual se analiza de la siguiente manera:

- A. Las señales que provienen del mismo alcance regresan al radar al mismo tiempo y pueden ser separadas o identificadas únicamente en función del desplazamiento Doppler (Efecto Doppler).
- B. Para un pulso de longitud  $\tau$ , transmitido con variación en la frecuencia, la señal instantánea que regresa al radar y que proviene de una distancia (alcance)  $R$  contiene la señal de retorno de los reflectores localizados dentro de un intervalo equivalente a  $\frac{c\tau}{2}$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz, en la dirección del alcance. La señal de cada uno está codificada de manera única con respecto a la frecuencia de modulación del pulso.

- C. A partir del terreno liso, los contornos de frecuencia Doppler constante forman una familia de círculos.
- D. La apertura real determina la distancia de influencia de un evento de saturación de la señal del radar.

#### **A.6 Instrumentos (Componentes del Sistema SAR).**

El Oscilador Coherente (COHO), es un reloj que controla el tiempo para la generación de una frecuencia (señal) muy estable, en el cual se emplean contadores para crear los tiempos de generación de pulsaciones (transmisión), y se forma la ventana de muestreo y la conversión A/D (analógico al digital).

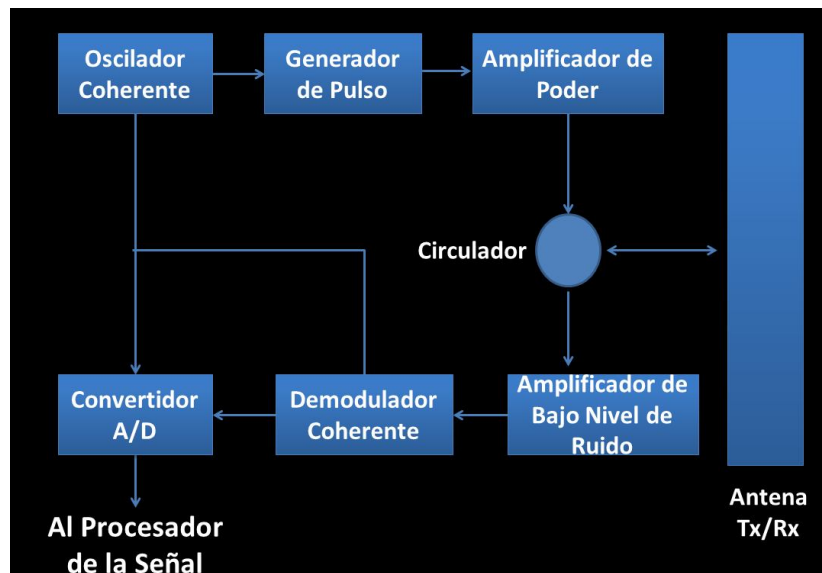
El Generador del Pulso genera una señal modulada en frecuencia con el ancho de banda deseado, por ejemplo 20 MHz (SAR/ERS-2 15.55 MHz) en este punto el pulso (modulado en frecuencia) es multiplicado por el oscilador coherente para elevar la frecuencia de su centro a la usada por el radar, ejemplo 5.3 GHz (frecuencia SAR/ERS-2).

Está débil señal RF es entonces amplificada a una potencia de KW (SAR/ERS-2 4.8 KW) por el Amplificador de Poder, y enviada a la antena, vía el circulador.

El Circulador es un conmutador que genera un ciclo en el trayecto a la antena entre el lado del transmisor y el lado del receptor de un sistema de radar. El ciclo de transmisión dura 30  $\mu$ sec, aproximadamente, mientras que el ciclo de recepción dura 600  $\mu$ sec, aproximadamente.

El circulador también desempeña la importante función de proteger el sensible receptor de la alta potencia del transmisor. La Antena es un transductor que recibe el débil eco de la superficie de la Tierra, y el Amplificador de Bajo Nivel de Ruido (LNA) lo amplifica por unos 120 dB, de tal manera que la electrónica analógica y digital siguiente pueda manejarlo. Debido a que el LNA tiene que procesar está débil señal recibida, la cual tiene una cantidad de Ruido de Johnson (ruido térmico) muy baja para mantener la SNR (relación señal a ruido) de la señal recibida en un nivel razonable. El Demodulador Coherente convierte la señal a una banda de base (o a una frecuencia intermedia) de tal manera que el muestreo

debe operar a la velocidad de Nyquist apropiada para el ancho de banda de la señal, finalmente el Convertidor Análogo Digital procesa la señal demodulada y crear la imagen (Fig. 71).



**Figura 71.** Esquema grafico de los componentes del sistema SAR. A/D (Análogo/Digital) y Tx/Rx (Transmitir/Recibir).

### A.7 Señal Electromagnética (Pulse Chirp).

El primer paso en el proceso de generación de una señal SAR consiste en generar un pulso modulado en frecuencia con un ancho de banda alrededor de 20 MHz (SAR/ERS-2 15.55 MHz).

El tiempo de inicio del pulso es controlado de manera precisa por un contador desde el oscilador coherente (coho). Los inicios de los pulsos son separados por la razón de repetición, o 1/PRF (1 pulse/pulse repetition frequency). Cada pulso tiene exactamente la misma forma, además de la misma fase inicial.

Por lo tanto, el pulso es multiplicado por la frecuencia portadora, de tal manera que la señal resultante tenga la frecuencia central deseada, en el SAR del ERS-2 dicha frecuencia es de 5.3 GHz, la cual se encuentra en la banda C del espectro electromagnético.

La portadora es la misma que la del coho (oscilador coherente), o se deriva de él. La señal que sale del multiplicador es filtrada, de tal manera que sólo se mantiene la señal alrededor de la frecuencia de la portadora. La señal que queda es el pulso, que es enviado al amplificador de potencia y transmitido. La señal del coho es una onda sinodal así como el pulso transmitido, ya que su ancho de banda fraccionario es muy pequeño, ejemplo 0.3%.

El demodulador coherente es esencialmente lo contrario al modulador generador de la señal, al ser la señal recibida la misma que la señal transmitida excepto por un cambio de ganancia y una demora en el tiempo. La señal demodulada es el pulso CHIRP de la banda de base generado originalmente, la fase resultante es cuadrática en tiempo, la cual tienen una derivada lineal, a dicha codificación se le llama a menudo modulación lineal de frecuencia o lineal. Sin embargo, la señal demodulada tiene dos propiedades importantes, tiene un retraso de tiempo dado por el tiempo necesario para que la señal regrese y cuenta con un cambio de fase proporcional al retraso del tiempo.

A continuación se muestra un esquema gráfico de la generación de la señal SAR (Figs. 72 y 73). La señal es una pulsación lineal FM impuesta sobre una portadora con frecuencia  $f_0$  Hz. Para el ERS, ENVISAT y RADASAT, la frecuencia portadora es de banda C de 5.3 GHz.



## Generación de la Señal Chirp

Pulso Modulado en frecuencia

Pulso Chirp: Bandwidth (ancho de banda) = 20

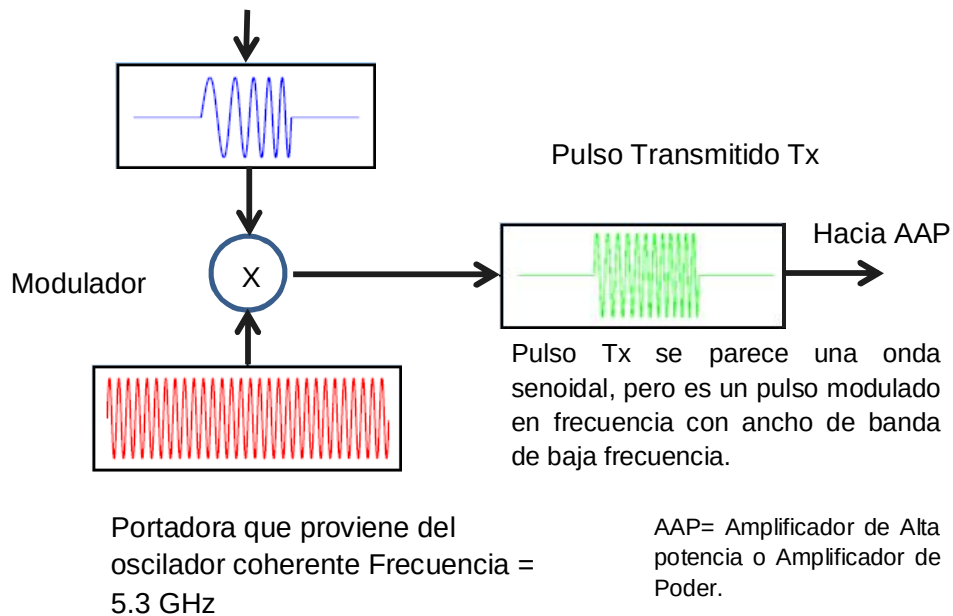


Figura 72.

## Demodulación Coherente

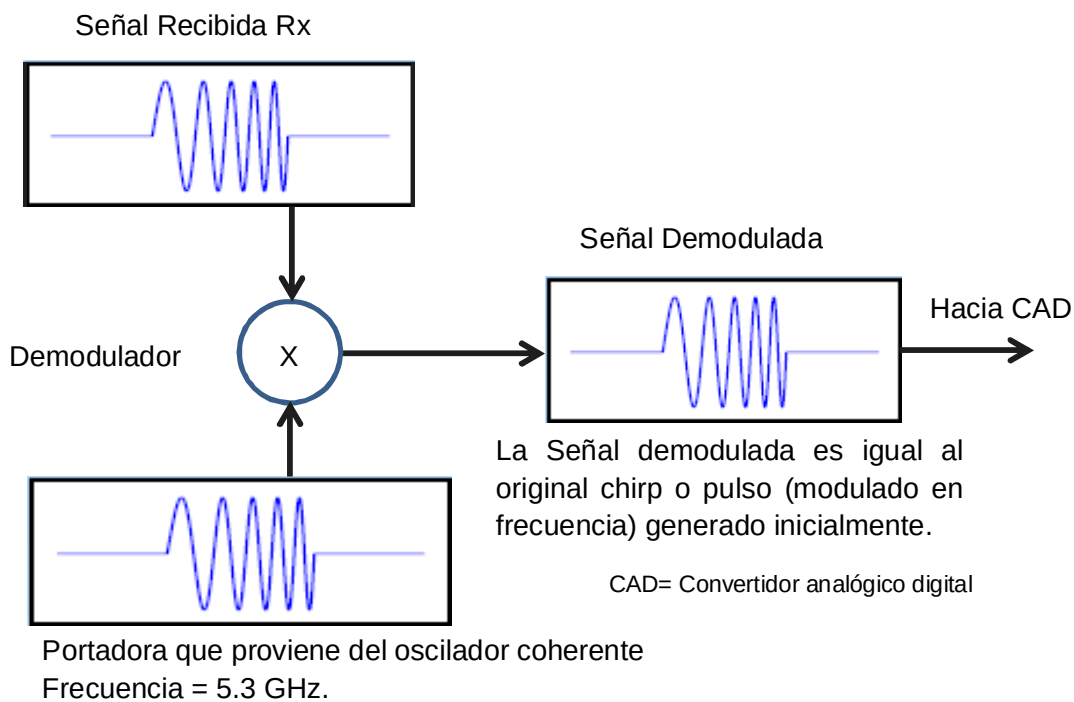
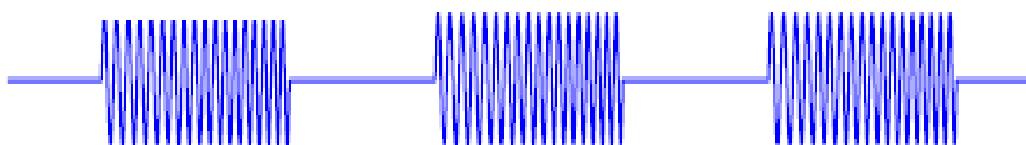


Figura 73.

Continuando con el análisis del pulso chirp veremos cómo la modulación provoca un cambio de fase, es decir, la activación del tiempo de retardo en la fase del Azimut (trayectoria de vuelta).

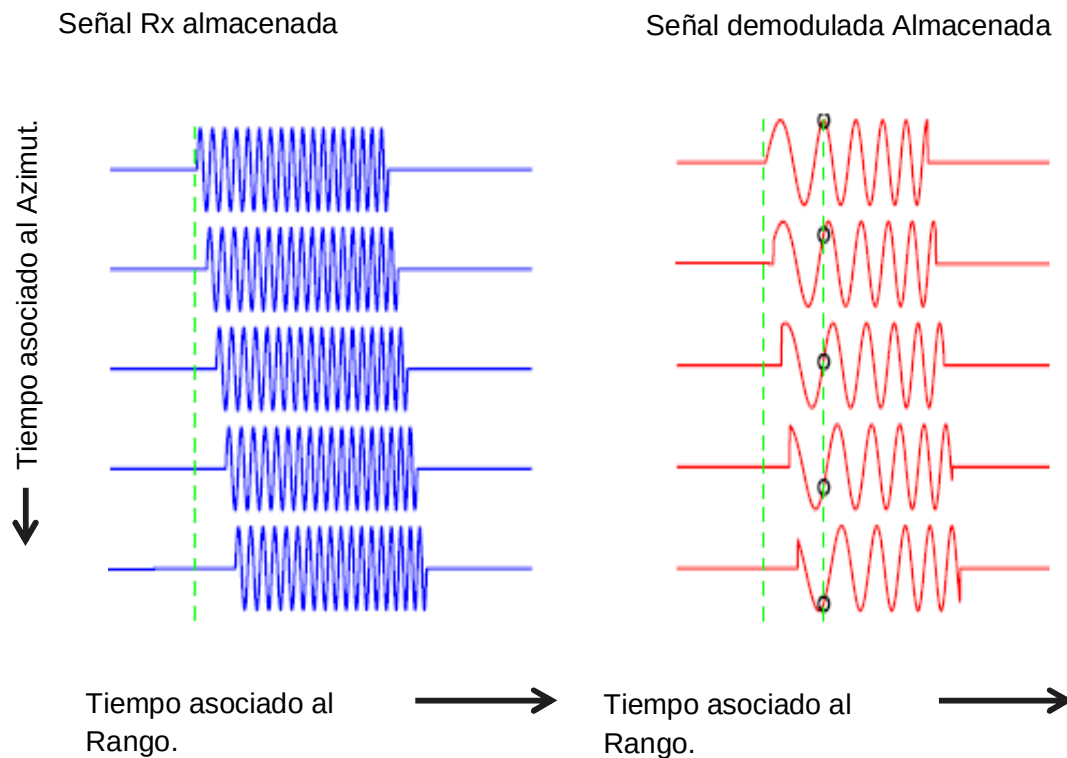


**Figura 74.** Señal Recibida (Rx).

Supongamos que la señal en la figura 74 es la señal ideal que proviene de un reflector puntual, y que el radar y el reflector se alejan lentamente. Esto se ve más claramente en la figura 75 las señales de la izquierda, donde la señal recibida es dividida y almacenada en la memoria.

La memoria interna del sistema SAR es bidimensional, cada renglón de memoria comienza en un tiempo preciso, después del inicio cada pulso que se transmite llamado tiempo asociado al alcance. El retraso de tiempo puede ser visto con respecto a la línea punteada vertical, que representa un tiempo asociado al alcance fijo. Nótese que, excepto por el retraso de tiempo, la señal recibida tiene exactamente la misma forma (fase) en cada renglón.

La dimensión vertical representa el azimut, sin embargo, cuando la señal es demodulada, el retraso de tiempo cambia la fase del pulso, debido a que la fase de la señal demodulada es *igual* a la fase de la señal recibida *menos* la fase del coho (oscilador coherente). Pero, al tiempo que la señal recibida es retrasada con respecto al coho, se imparte en la señal un cambio de fase proporcional al retraso. Se puede observar el cambio de fase en el recuadro inferior derecho, donde los círculos representan muestras tomadas a un tiempo asociado al alcance constante (Fig. 75).

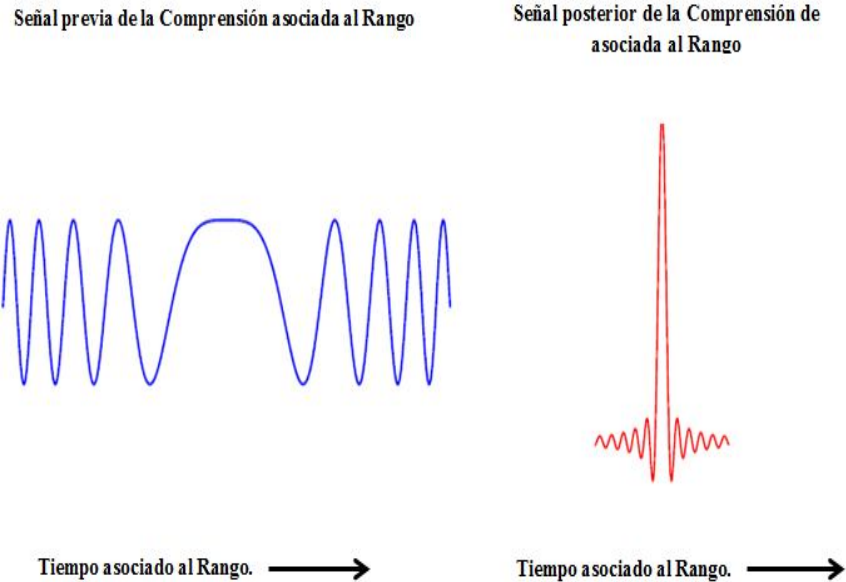


**Figura 75.**

Después de la demodulación, se obtienen muestras de la señal y se comprime en la dirección de alcance. La compresión se logra mediante un filtro adaptado, que es el complejo conjugado de la señal recibida ideal. Se emplean promedios para controlar los lóbulos laterales del pulso comprimido.

El ancho del pulso comprimido de -3 dB (en unidades de tiempo) es aproximadamente igual al inverso del ancho de banda del pulso. La fase del pulso comprimido es igual a la fase de la señal demodulada (a cierto punto de referencia de su inicio) (Fig. 76).

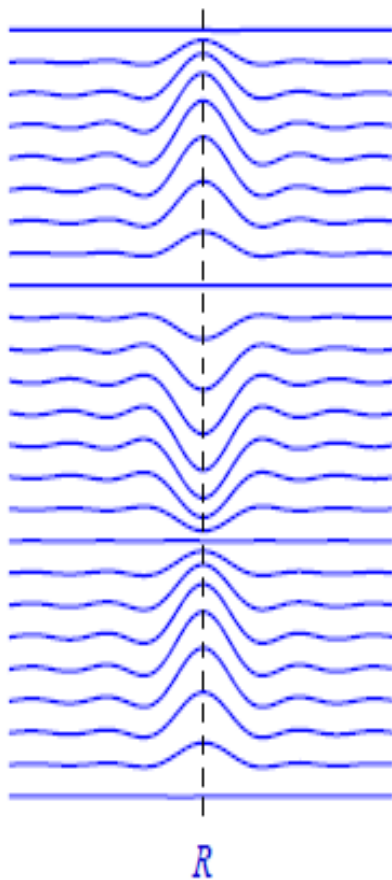
### Rango de Compresión de la Señal Recibida



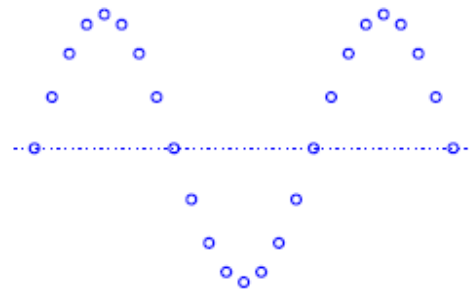
**Figura 76.**

Para mostrar la diferencia del comportamiento del alcance en la memoria y en el azimut, en la figura 77, se muestra un ejemplo de como un reflector (con compresión asociada al alcance) aparece en la memoria de la señal (izquierda), donde se ven 25 líneas de alcance. En la memoria, el alcance corre horizontalmente, mientras que el azimut corre verticalmente.

El alcance de un reflector puntual aumente linealmente con cada pulso (con cada línea del alcance), pero cada incremento siguiente del retraso de tiempo es tan pequeño que no es evidente en la cifra (el tiempo de retraso sobre 25 pulsos es de solo 93 *nseg*, representando un cambio en el alcance de  $\lambda/2$ , o sólo 0.0019 de una muestra).



Parte real de la señal demodulada contra el tiempo asociado al Rango (el tiempo del azimut aumenta con cada línea).

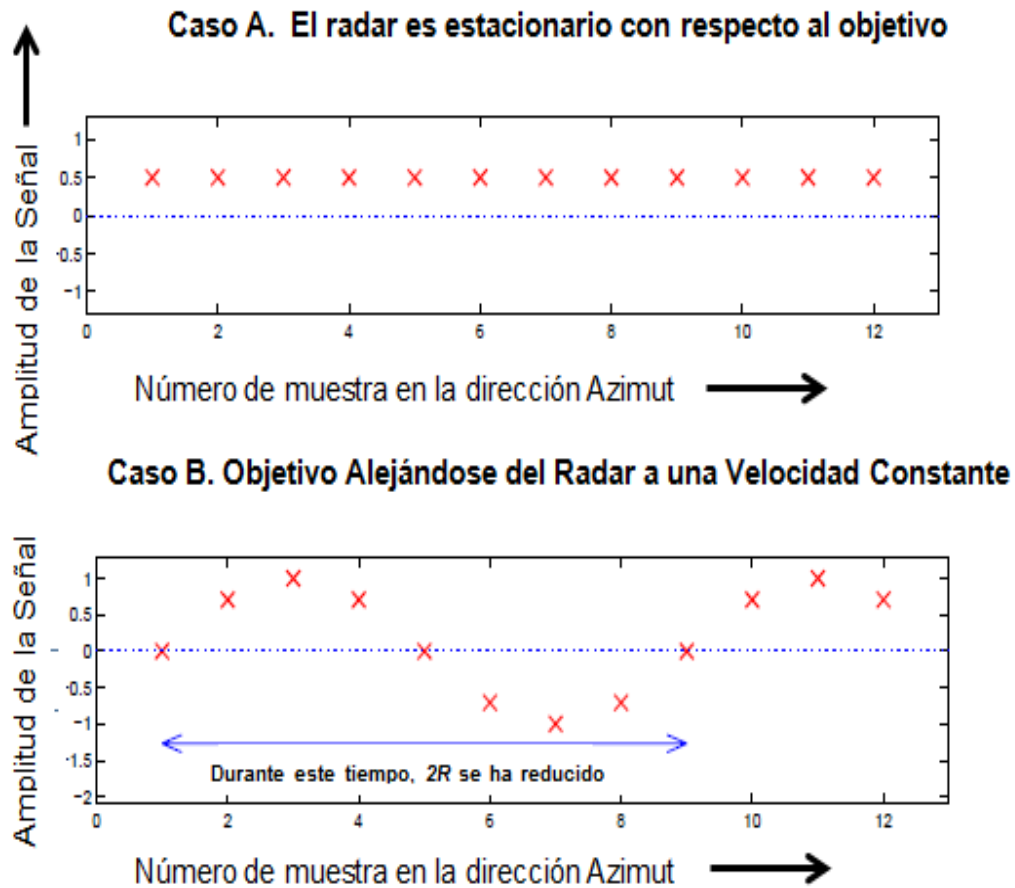


Parte real de la señal demodulada en el rango  $R$  contra el tiempo asociado azimut.

**Figura 77.** Reflector puntual en la memoria de la computadora.

Entonces, se examina la señal almacenada a un alcance fijo  $R$  (en el máximo reflector puntual “comprimido”), y retiramos esas 25 muestras contra el tiempo del azimut, observamos la onda senoidal que se muestra en la derecha. Esta es la señal en función del azimut del sistema SAR. Ahora observaremos la señal en función del azimut en los dos casos siguientes (Fig. 78).

### Análisis de la Señal en la Dirección del Azimut

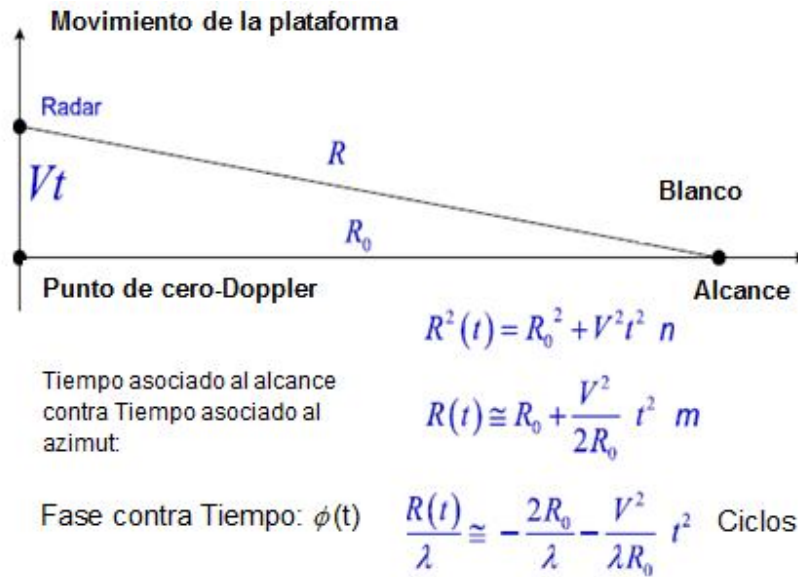


**Figura 78.** Comportamiento de la señal del sistema SAR. (a) Objetivo fijo. (b) Objetivo alejándose a velocidad constante.

En el caso A, el reflector es estacionario con respecto al radar. Así no hay tiempo de retraso diferencial entre los pulsos, y la fase de cada pulso siguiente es constante. En otras palabras, la señal asociada al azimut que se muestra en este caso tiene frecuencia cero. En caso contrario el B, el reflector se está alejando del radar a una velocidad constante. Cada vez que el alcance al reflector aumenta por  $\lambda/2$  (el alcance de la transmisión más el de recepción incrementa por  $\lambda$ ), la fase de la señal asociada al azimut cambia por  $360^\circ$ . Por consecuencia la señal asociada en el caso B es una onda senoidal, se le denomina frecuencia Doppler:

$$\frac{2R}{\lambda} \text{ Hz} \quad \text{Expresión 1.}$$

Retomando lo anterior, se presenta un ejemplo del cambio en la fase inducido por el movimiento del sensor:

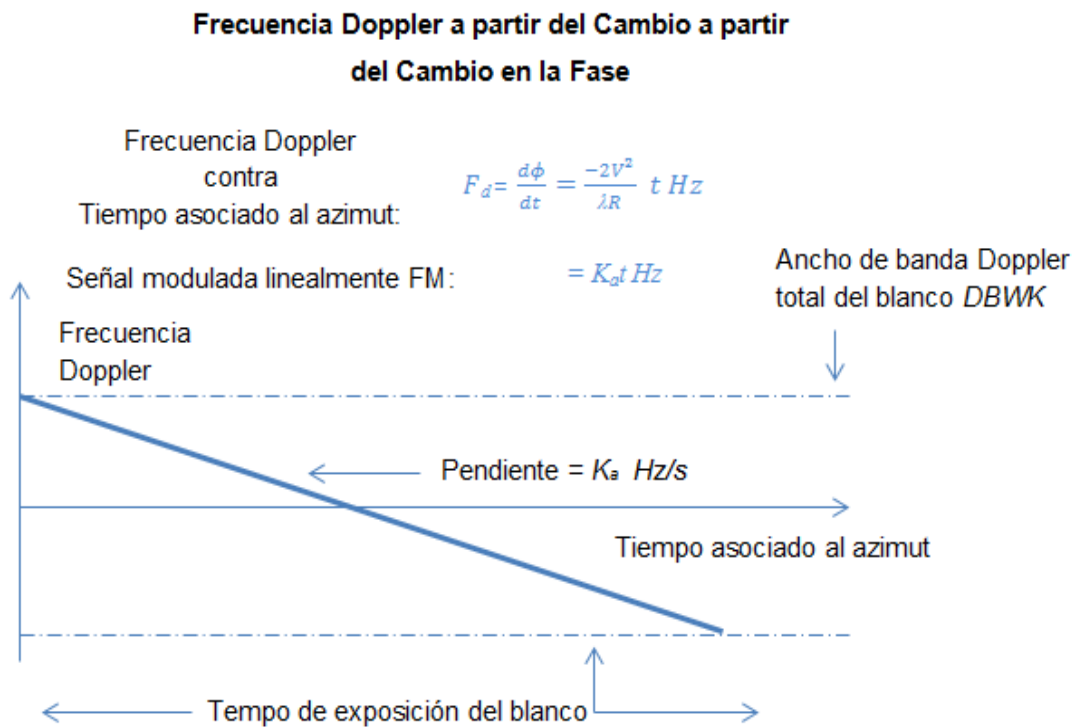


**Figura 79.** Cambio de fase inducido por el movimiento del sensor.

En la figura 79 vemos un movimiento con velocidad constante, en línea recta, la posición de cero-Doppler del radar, la posición actual del radar y la del reflector u objetivo, forman en conjunto un triángulo rectángulo. La posición de cero-Doppler es el punto donde el radar está más cerca del reflector, a una distancia  $R_0$ .

Consecuentemente el alcance  $R$  varía con el tiempo como una hipérbola, pero la hipérbola puede aproximarse a una parábola, cuando el ancho de haz del radar es relativamente angosto. El cambio en el alcance induce un cambio de fase, y también toma una forma parabólica con el tiempo. La señal con una fase parabólica o una frecuencia lineal es un pulso modulado en frecuencia. La forma es muy similar al pulso asociado al alcance, pero a una escala de tiempo muy diferente (el ancho de banda asociado al azimut es de sólo unos cientos a mil Hz).

Empleado las unidades de ciclos para la fase, así al diferenciar la fase en el siguiente ejemplo, se obtiene la frecuencia en Hz (Fig. 80).



**Figura 80.**

En la figura 81, la frecuencia Doppler es el ritmo de cambio de la fase, lo que lo hace una función lineal del tiempo para el movimiento rectilíneo del SAR, mostrando la forma típica de la frecuencia Doppler contra Tiempo en la señal lineal FM (frecuencia modulada) del SAR de un reflector puntual. La inclinación de la curva o el índice FM ( $K_a$ ), es la propiedad más importante de esta frecuencia, se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{-2V^2}{(\lambda R)} \text{ Hz/s} \quad \text{Expresión 2.}$$

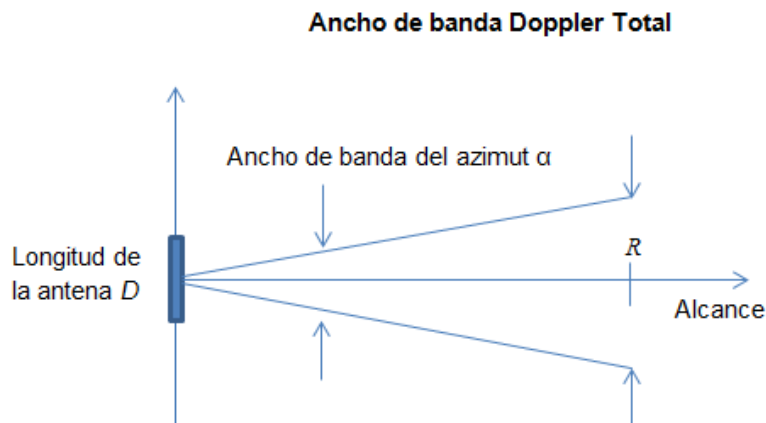
El ancho de banda, la frecuencia central y la duración o tiempo de exposición, son parámetros importantes de la señal. Otro punto a revisar es el



ancho de banda Doppler generado por un sistema SAR, ya que su diseño proporciona los parámetros fijos (Fig. 81):

- La longitud de la antena  $D$ .
- La longitud de onda del radar  $\lambda$ .
- La velocidad del sensor  $V$ .

El alcance  $R$  es proporcional al tiempo de exposición del azimut y a la longitud del área iluminada, el índice FM del azimut  $K_a$  es inversamente proporcional al alcance, con el siguiente resultado, el ancho de banda de la trayectoria de vuelo, generado  $2 \frac{V}{D}$  es independiente del alcance y de la longitud de onda. Es importante destacar que para aumentar el ancho de banda (para obtener más alta resolución), se debe hacer más corta la antena.



|                                  |                                                     |                    |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|
| Longitud de la región iluminada: | $L = \alpha R = \frac{\lambda R}{D} \text{ metros}$ | <b>Ecuación 1.</b> |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|

|                       |                                                       |                    |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|
| Tiempo de exposición: | $T_e = \frac{L}{V} = \frac{\lambda R}{D V} \text{ s}$ | <b>Ecuación 2.</b> |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|

|                               |                                           |                    |
|-------------------------------|-------------------------------------------|--------------------|
| Ancho de banda Doppler total: | $DBW = K_a T_e = \frac{2V}{D} \text{ Hz}$ | <b>Ecuación 3.</b> |
|-------------------------------|-------------------------------------------|--------------------|

### Puntos los siguientes a considerar:

- Independencia del alcance y longitud de onda.
- Mientras menor sea  $D$ , mayor será  $DBW$  (Ancho de banda Doppler).

En otros instrumentos, cuando se expresa la resolución en unidades de tiempo, es aproximadamente igual al inverso del ancho de banda, o  $\frac{D}{(2V)S}$  como en el caso anterior. Por lo tanto, para obtener la resolución en unidades de espacio, multiplicamos por la velocidad del sensor (azimut) o  $V$ . Entonces la resolución en la dirección de vuelo es  $\frac{D}{2m}$ .

### Resolución en la Dirección del Azimut.

$$\text{Ancho de banda Doppler} = \frac{2V}{D} \text{ Hz} \quad \text{Ecuación 4.}$$

$$\text{Resolución en Tiempo} = \frac{D}{2V} \text{ S} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Resolución en unidades

$$\text{de Espacio} = \text{Resolución en Tiempo} * V = \frac{D}{2} \text{ m} \quad \text{Ecuación 6.}$$

Dado lo anterior, el SAR tiene la propiedad de que su resolución es independiente de la distancia y de la longitud de onda del radar. Pero dada la SNR que disminuye al aumentar la distancia en la dirección del alcance y la frecuencia, porque se requiere una mayor potencia para alcances mayores.

### A.8 Cambio en la Fase Inducido por el Movimiento del Sensor (Efecto Doppler).

Gambini (2006) menciona que el Radar de Apertura Sintética, hace uso de una técnica que permite simular una antena por medio de la sucesión de señales recibidas por una antena real. Esta técnica se basa en el efecto Doppler, que

consiste en el cambio de fase de una señal debido a un cambio de distancia, y que afecta a la observación cuando hay un movimiento relativo entre el objeto muestreado (censado) y el sensor. Entonces, se procesan los pulsos “crudos” obtenidos por el radar, de manera que la resolución en la trayectoria de vuelo (azimut) resulta independiente de la altura. Mediante la apertura sintética, esta resolución depende únicamente de la longitud  $L_y$  (véase geometría del SAR), que corresponde a la longitud de la antena en la dirección asociada al azimut. Esto significa que entre los radares de imágenes, el SAR posee la particularidad de que su resolución espacial en el azimut no depende de la distancia a la zona muestreada, sino que sólo depende de la longitud de la antena, la cual está dada por (Exp. 3):

$$\frac{L_y}{2} \quad \text{Expresión 3.}$$

La independencia de la resolución en el azimut con respecto a la distancia a la zona muestreada, permite la utilización de Radares de Apertura Sintética a bordo de satélites, sin pérdida en la resolución espacial. Ya que la dirección de rango (alcance) es perpendicular al azimut, el rango de un punto sobre la tierra puede medirse como la distancia del mismo a la trayectoria de vuelo (rango oblicuo) o como la proyección de esta distancia sobre la tierra.

El radar emite pulsos de duración  $\tau$ , la resolución en el rango oblicuo  $\Delta r$  queda determinada por la ecuación:

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz. La resolución en el rango de tierra es:

$$R_r = \frac{\Delta r}{\sin\theta} = \frac{c\tau}{2} \frac{1}{\sin\theta} \quad \text{Ecuación 8.}$$

Considerando que la resolución en rango es independiente de la altura  $h$ .

### A.9 Estructura de la Señal SAR Transmitida (Modulada).

El pulso Chirp o pulsación lineal FM conducida por una señal portadora con frecuencia  $f_0$  Hz, como hablamos anterior mente es un pulso estable modulado en frecuencia generada en él oscilador coherente, el cual es usado como portadora de la señal del radar, pero como explicamos en el tema componentes del sistema SAR, esta señal resultante es débil por lo que es necesario proporcionarla de más poder o energía, por medio del amplificador de poder y desde este punto ser transmitida por la antena Rx.

Para las plataformas ERS, ENVISAT y RADASAT, la frecuencia portadora es de banda C de 5.3 GHz, la señal de RF (Radio Frecuencia), en la banda C de las microondas, es menos perturbada por condiciones adversas. Por lo tanto es mayormente usada en la percepción remota satelital, pero contiene una desventaja que será abordada en el tema desventajas y limitantes del SAR.

El pulso lineal FM tiene las propiedades de:

- Duración  $\tau_l$ , usualmente 30 – 40  $\mu$ s.
- Frecuencia central  $f_0$ , usualmente cero.
- Ancho de banda  $BW$ , usualmente 10 – 30 MHz.
- Índice FM =  $BW / \tau_l$ , frecuencia alrededor de 0.5 MHz /  $\mu$ s.

El Chirp está seleccionado para ser FM lineal, de tal manera que todas las frecuencias dentro del ancho de banda seleccionado son utilizadas de igual manera, un criterio para la buena compensación del pulso. La señal SAR es un pulso modulado linealmente en frecuencia (FM) y está constituida de la siguiente manera.

$$S_t(\eta, \tau) = P(\tau) \cos\{2\pi f_0 + \pi K_r(\tau - \tau_l/2)^2\}, \tau = [0, \tau_l] \quad \text{Ecuación 9.}$$

Dónde:

|           |                                                  |      |
|-----------|--------------------------------------------------|------|
| $\eta$    | Es el tiempo asociado al azimut                  | s    |
| $\tau$    | Es el tiempo asociado al alcance                 | s    |
| $P(\tau)$ | Envolvente del pulso asociado al alcance (chirp) |      |
| $f_0$     | Frecuencia de la señal portadora                 | Hz   |
| $K_r$     | Razón de modulación FM en el alcance             | Hz/s |
| $\tau_l$  | Duración de pulso asociado al alcance            | s    |

Las pulsaciones se repiten en una frecuencia  $F_a$  Hz, lo que llamamos frecuencia de repetición del pulso (PRF).  $\tau$  es un tiempo continuo, mientras  $\eta$  es una variable de tiempo discreta. Para hablar o dar un análisis de la señal recibida por el SAR, daremos un ejemplo para hacer más ilustrativo y entendible: Tenemos un terreno completamente no-reflejante (sin rugosidad), excepto por un solo blanco puntual o reflector ideal (objetivo). Tomando en cuenta que es un solo objetivo será menos complejo hacer un análisis del funcionamiento del sistema SAR. Idealmente, la señal recibida desde un solo reflector puntual puede ser expresada como:

$$S_t(\eta, \tau) = P\{\tau - \tau_d\} \cos \left\{ 2\pi f_0(\tau - \tau_d) + \pi K_r \left( \tau - \frac{\tau_l}{2} - \tau_d \right)^2 \right\}, \tau = [\tau_d, \tau_l - \tau_d]$$

**Ecuación 10.**

En una condición ideal, la señal recibida es la misma señal que la transmitida, pero como hemos visto anteriormente, esta señal contiene un retraso de tiempo  $\tau_d$  proporcional al alcance  $R$ :

$$\tau_d = \frac{2R(\eta)}{c} \quad \text{Ecuación 11.}$$

Dónde:  $R(\eta)$  es la distancia en la dirección del alcance al objetivo o reflector puntual (objetivo), o reflector puntual para el pulso transmitido a una tiempo  $(\eta)$  y  $C$  es la velocidad de la luz.

Al derivar las operaciones necesarias para el procesamiento de la señal para enfocar la imagen, podemos observar que el *impulso* de respuesta del SAR, ya que en su totalidad es un sistema lineal.

#### **A.10 Estructura de la Señal SAR Recibida (Demodulada).**

Como hemos ido expresando anteriormente, la señal recibida por la antena del SAR es demodulada debido a que en operaciones de procesamiento subsecuentes, la señal portadora será separada del pulso chirp ya que desde un inicio este pulso de frecuencia modulada es el que posee la información para el tratamiento y procesamiento digital, esto no se significa que el efecto de la señal portadora no sea de importancia ya que el cambio de fase  $2\pi f_0 \tau_d$  es una función directa de la frecuencia portadora del radar u otras palabras se refiere a la longitud de onda  $\lambda = c / f_0$ .

El demodulador coho (coherente) multiplica la señal recibida por un oscilador coho local. Por lo tanto cuando se retrasa la señal, avanza la fase del oscilador local, de tal manera que el proceso de demodulación cambia el retraso  $\tau_d$  en la fase del azimut  $2\pi f_0 \tau_d$ .

#### **A.11 La Ecuación del Alcance (Rango).**

Expresa el alcance del centro de la fase de la antena al centro de dispersión del blanco, como una función del número de pulsaciones (PRF), o el tiempo del azimut. Es considerada la ecuación más importante en el sistema SAR, ya que la codificación de la fase del azimut, y el subsecuente procesamiento de la señal del azimut, depende de este cambio en el alcance.

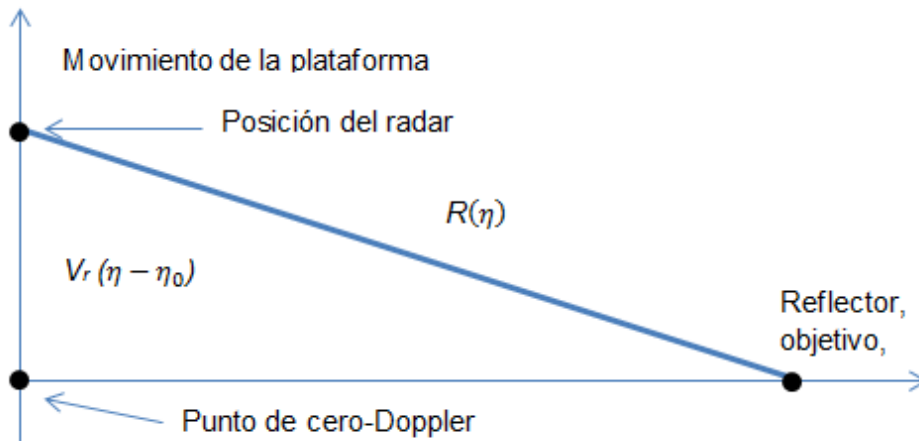
Es el cambio en el alcance lo que hace que el SAR funcione, en el sentido de que nos permita procesar los datos recibidos desde una superficie rugosa para así obtener una alta resolución en el azimut. En teledetección es común usar ejemplos con movimientos en línea recta que se ilustran en la figura 80, esta suposición es más aplicada o exacta al hablar de sistemas SAR a bordo de aeronaves; en los casos que se encuentre a bordo de un satélite, de misma

manera puede ser aplicado a condición de que se permita que  $V_r$  cambie con el alcance. La relación geométrica más importante está dada por la ecuación que describe el alcance:

$$R^2(\eta) = R_0^2 + V_r^2(\eta - \eta_0)^2 \quad \text{Ecuación 12.}$$

$R(\eta)$ , en la que se incluye la aproximación de movimiento rectilíneo de la plataforma. Analizando la información anterior tenemos que  $V_r(\eta - \eta_0) \ll R_0$ , por lo cual podemos dar uso una serie de Taylor para aproximar  $R(\eta)$  mediante la parábola:

$$R(\eta) = R_0 + V_r^2 \left( \frac{(\eta - \eta_0)^2}{2R_0} \right) \quad \text{Ecuación 13.}$$



**Figura 82.** Ejemplo de movimiento en línea recta de la plataforma.

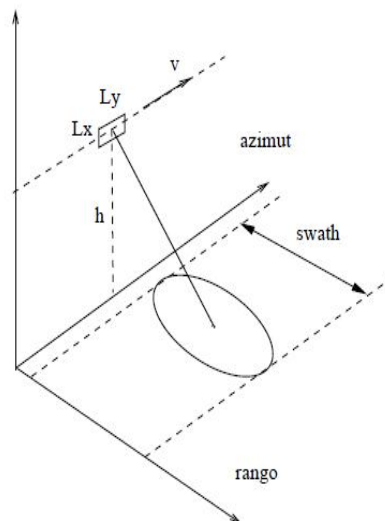
### A.12 Geometría del SAR.

Los sistemas de Radar (*Radio Detection And Ranging*) son capaces de adquirir imágenes de la superficie terrestre en alta resolución. La mayoría de los radares transportados en plataformas espaciales o en aeronaves, se les denomina radares de vista lateral o SLAR (Side Looking Airbone Radar), los dos tipos de sistemas de radar SLAR más usados son: El Radar de Apertura Real (RAR “Real Aperture Radar”) y Radar de Apertura Sintética (SAR “Synthetic Aperture Radar”).

La plataforma espacial o satélite se desplaza sobre la superficie de la Tierra, con una altitud de 780 Km y a una velocidad de 27,000 km/h (Datos ERS-2), en su trayecto la antena ilumina un área de interés por medio de la emisión de pulsos de radiación electromagnética, los cuales al hacer contacto con la una superficie scatter (rugosa), crea un efecto de dispersión, la señal retrodispersada o backscattering resultante de la resonancia Bragg (amplificación de las longitudes de onda al hacer contacto) es parcialmente recibida por la antena.

En la figura 83, se muestra un esquema gráfico de la geometría del SAR, el radar se desplaza a una velocidad " $v$ " y a una altura " $h$ ", la dirección de avance o trayectoria de vuelo se denomina "*Azimuth*", la dirección perpendicular a ésta se denomina "*Rango*", la dirección perpendicular al plano de la tierra, que representa la altura, se denomina "*Nadir*".

El ancho de la zona iluminada o zona de barrido, se denomina "*Swath*",  $L_x$  y  $L_y$  son las longitudes de la antena en la dirección de la altura (1 m.) y en la dirección del azimuth (10 m.). La energía electromagnética se concentra principalmente en el lóbulo central del diagrama, y en instantes ilumina una zona del terreno, representado por la elipse.



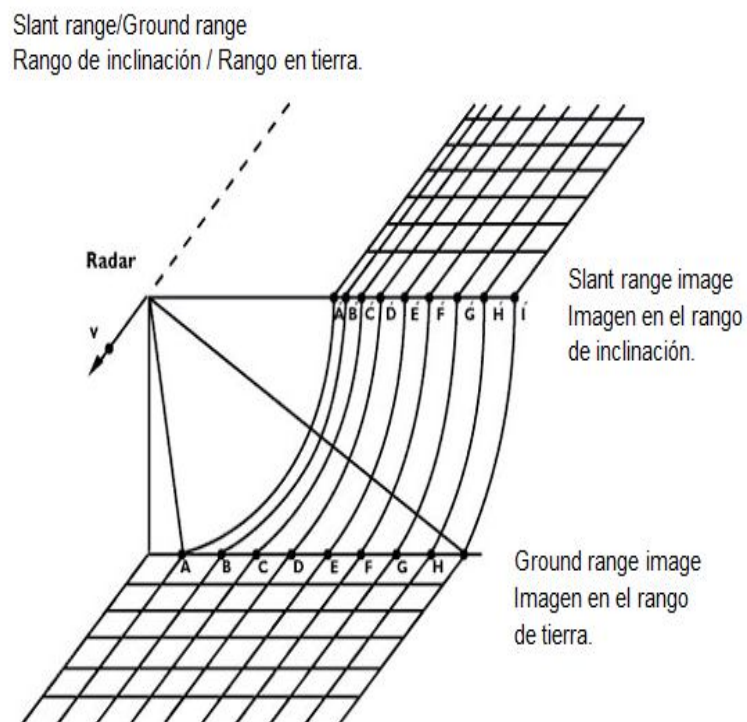
**Figura 83.** Geometría del SAR.



En la geometría del SAR existen dos distancias importantes y bien definidas entre el blanco y el radar, el rango de inclinación  $R_s$  (slant range) y el rango en tierra  $R_g$  (ground range).

- $R_s$  es la distancia entre el punto de intersección del el nadir (la vertical o plomada) con la línea longitudinal del radar y el blanco.
- $R_g$  es la distancia entre el punto de intersección del nadir con la horizontal y el blanco.

El rango de inclinación ( $R_s$ ) es calculado a partir del tiempo transcurrido desde la emisión del pulso hasta su regreso a la antena (Fig. 84).



**Figura 84.** Geometría del SAR distancias importantes.

La figura muestra dos tipos de datos que suministra el radar:

1. **Imagen en el rango de inclinación:** Son las imágenes en donde las distancias se miden entre la antena y el blanco.
2. **Imagen en el alcance sobre el terreno:** Son aquellas imágenes en donde las distancias se miden entre la pista de tierra de la plataforma y el blanco, y se coloca en la posición correcta en el plano de referencia elegido.

La adquisición de datos Slant range son las más comunes de las mediciones de alcance del radar, sin embargo, para la transformación al rango de tierra requiere una corrección en cada punto de datos o píxel (unidad elemental de visualización) para la pendiente del terreno local y de elevación. Las distorsiones geométricas presentes en una imagen de radar se pueden dividir en:

- A. **Rango de distorsiones:** las mediciones del radar varían en inclinación, pero, para una imagen que representar correctamente la superficie, debe ser corregida o convertida a rango de tierra.
- B. **Elevación de distorsiones:** esto ocurre en los casos en que los puntos tienen una altura diferente a la elevación del terreno medio.

### **A.13 Algoritmos de procesamiento del SAR.**

Conforme hemos avanzado en el análisis del Radar de Apertura Sintética, se ha resaltado que el procesamiento digital de la señal de los datos recibidos por el SAR, es una de sus mejoras que permiten el alto desempeño de los sistemas modernos de radar. En sus inicios el procesamiento en el sistema SAR era realizado mediante óptica láser coherente, por medio de un sistema de imágenes de radar láser convencionales, no era posible obtener una alta resolución espacial debido al límite de difracción de la apertura del telescopio. A medida que aumenta el tamaño de la apertura, la resolución mejora, al aumentar el rango, degrada la resolución.

Por lo cual la proyección de imágenes de alta resolución a grandes distancias requiere un telescopio de grandes dimensiones. La resolución de la imagen es más dependiente de la longitud de onda, con longitudes de onda mayores se producen imágenes con menor resolución espacial. Y considerando las limitaciones de la difracción son más evidentes en el dominio de radio-frecuencia (en comparación con el dominio óptico) (Green *et al.*, 1995). Explicado de otra manera la difracción tiene consecuencias importantes en el proceso de la formación de la imagen y, en particular, impone ciertos límites a la “capacidad” de resolución espacial de los sistemas ópticos.

La imagen de dos puntos espacialmente separados en el plano objeto y que emiten radiación incoherentemente entre sí, estará representada en el plano imagen, no por otros dos puntos, tal como predice la óptica geométrica en ausencia de aberraciones, sino por dos figuras de Airy (mancha de difracción en la que no puede saberse si el objeto era un punto o dos o más) debido a la difracción por la pupila del sistema.

Si la separación angular en el plano objeto de los dos puntos va disminuyendo, llegará un momento en el que las correspondientes figuras de difracción solaparán espacialmente en el plano imagen, haciendo imposible su reconocimiento (Carreño & Antón, 2001). Pero en los 80's, se sustituyó por el procesamiento digital, lo cual ofreció las ventajas de mayor intervalo dinámico, mejor control del ruido y enfoque más preciso.

En un principio, los procesadores digitales SAR eran relativamente lentos, pero en la actualidad pueden ser contruidos de tal manera que operen en tiempo real. A continuación daremos una revisión de los algoritmos más común mente usados actualmente.

#### **A.14 Algoritmos de Procesamiento Actuales.**

- **Alcance/Doppler.**

Algoritmo de uso diverso con propósitos generales, buen equilibrio entre la precisión y la rapidez del proceso.

- **Specan.**

Algoritmo para el procesamiento de prueba (visualización rápida) o ScanSAR.

- **Aplicación del factor de escala asociado al pulso modulado en frecuencia.**

Algoritmo para mejor exactitud de la fase y estrabismo moderado.

- **Ecuación de onda.**

Algoritmo para sistemas de apertura amplia y/o de mayor estrabismo.

- **Formato polar.**

Algoritmo para el procesamiento por iluminación de una región en particular.

De los anteriores el algoritmo Alcance/Doppler, sobre sale considerablemente debido a su constante uso, este fue desarrollado en 1978 y como se mencionó anteriormente es el más general y el más utilizado, es capaz de manejar eficientemente la mayoría de los casos del SAR, excepto aquellos que tienen aperturas muy amplias, alto estrabismo y ScanSAR.

SPECAN es un algoritmo desarrollado en 1979 para utilizar el mínimo de memoria y operaciones de cómputo para uso espacial, ha resultado ser muy eficiente para baja resolución, procesamiento de miradas múltiples y para el procesamiento de ScanSAR, donde es particularmente eficiente por que la estructura tiempo-frecuencia del algoritmo, en el procesador del SAR puede ser precisamente ajustado a la estructura tiempo-frecuencia de la recolección de datos del ScanSAR, pero no maneja con facilidad la corrección de la migración de las células en la dirección del alcance (range cell migration correction "RCMC").

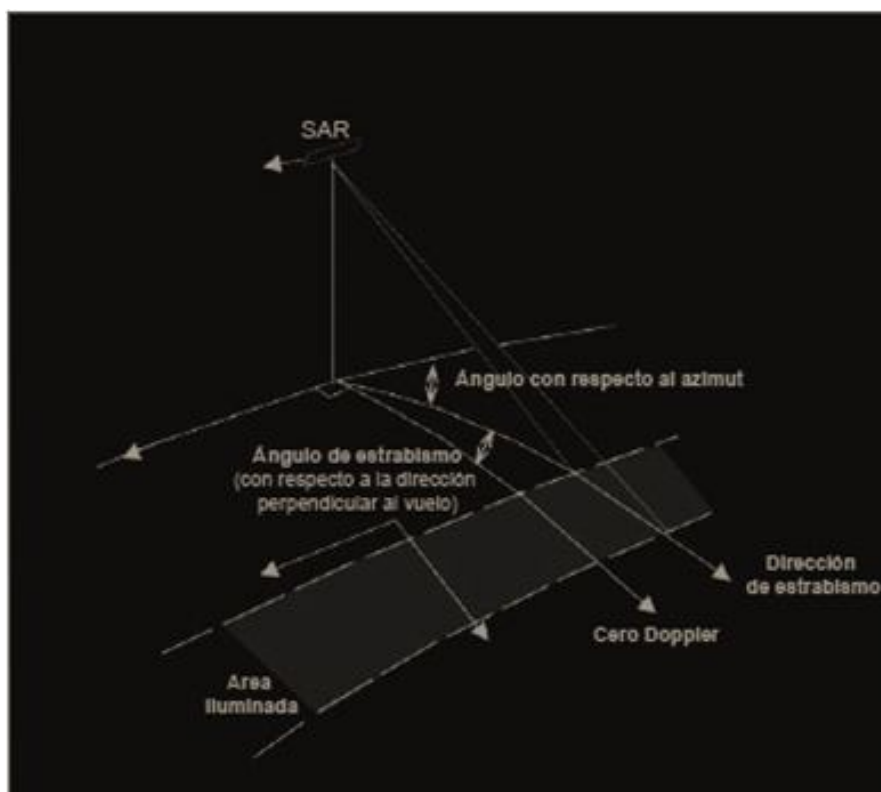
El tercer algoritmo Escala de pulso modulado en frecuencia se desarrollo en 1992, su ventaja principal es que obtiene una mayor precisión de la fase porque prescinde del interpolador de la RCMC, ya que en su lugar desempeña la RCMC mediante la escala (expansiones y cambios en el alcance) del pulso modulado en frecuencia en el dominio de alcance-tiempo, azimut-frecuencia.

El algoritmo de Ecuación de onda fue desarrollado originalmente para el procesamiento sísmico, y fue adaptado al procesamiento del SAR en 1986, también es conocido como algoritmo de migración en la dirección del alcance

(RMA), o Algoritmo de Número de Onda, su operación se centra en el dominio de la frecuencia bidimensional (número de onda), y en el manejo de datos de amplias aperturas y alto estrabismo con una eficaz precisión, pero si la velocidad del radar varia demasiado con el alcance, la precisión se verá muy afectada, otro aspecto importante es que no tiene la necesidad de un término explícito de Compresión Secundaria del Alcance "SRC", ya que se encuentra dentro o implícito en la formulación del propio algoritmo, y nuevamente el alcance marca una limitante ya que el SRC no puede ser ajustado debido a lo antes mencionado.

El algoritmo de Formato de onda fue desarrollado inicialmente para SARs aéreos con estrabismo y haz concentrado o spotlight, y su uso es muy limitado para SARs a bordo de plataformas satelitales. Una de sus virtudes es que puede enfocar de manera exacta en cualquier ángulo de estrabismo, pero posee una limitada profundidad de enfoque (Fig. 85).

#### SAR con Observación Lateral Oblicua

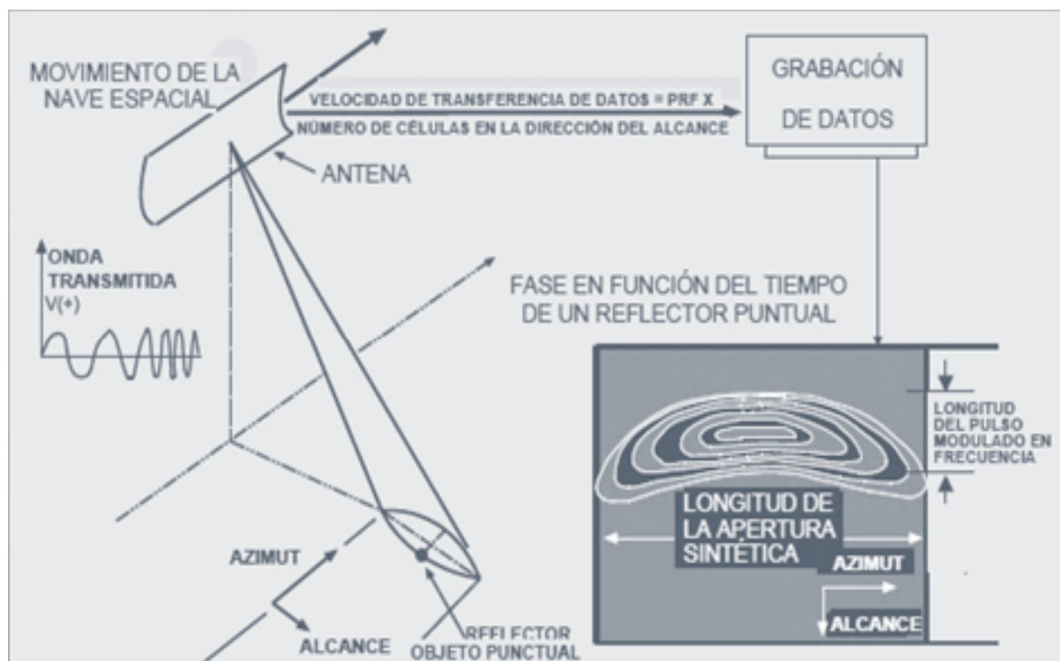


**Figura 85.** Geometría del SAR, observación lateral oblicua.

### A.15 Procesamiento del SAR.

Como hemos visto el sistema SAR es muy avanzado y complejo, para generar imágenes de alta resolución espacial, el SAR hace uso de todos sus componentes para que la señal o pulsos de energía electromagnética emitida por la antena sea estable y potente. La antena SAR es de observación lateral de tal manera que los retornos provenientes de puntos del terreno con diferente distancia en rango lleguen en distintos tiempo, lo cual permite distinguirlos y calcular la distancia del punto al radar en la dirección de rango.

Cuando el haz de iluminación del radar pasa sobre un punto en el terreno, se considera la rugosidad y la geometría como factores que influyen directamente en la señal por lo cual toda la información que es retrodispersada a partir de ese punto se adquiere y se almacena en función del tiempo, como una fase variable bidimensional (en función de la distancia en la dirección de alcance “Rango” y en la trayectoria de vuelo “Azimut”). En la ausencia de saturación de la señal del radar, la fase de la señal que proviene de todos los puntos de la imagen, se combina linealmente en una serie de tiempo para formar los datos de la “señal” SAR (Fig. 86).



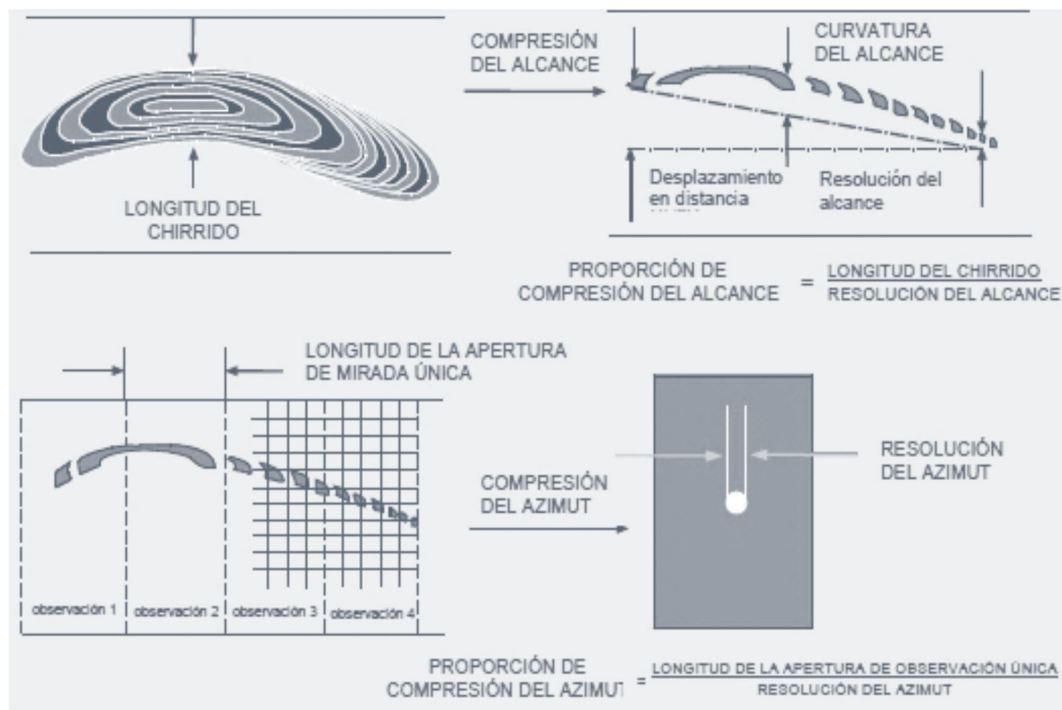
**Figura 86.** Eco de un objeto puntual en un sistema SAR.

El procesamiento interno del SAR decodifica la señal de la fase para cada punto en la dirección del alcance/azimut y enfoca esta información hacia una función de respuesta de tipo impulso. El ancho de la función de respuesta, en las direcciones es del alcance y el azimut, representa la resolución en esas direcciones. El teorema de Nyquist requiere que se obtengan por lo menos dos muestras por cada ancho de la función de respuesta tipo impulso, a partir del procesamiento de los datos.

Estas muestras son los “píxeles” de las imágenes del radar. Las coordenadas naturales de los datos, en función de la dirección del alcance y la del azimut, no son separables. Las etapas del procesamiento están acopladas en torno a esas direcciones, el desplazamiento en la dirección del alcance y la curvatura en esa dirección toman en cuenta los siguientes 3 puntos:

- Resolución contra ancho del haz.
- Estrabismo del haz (antena orientada con un ángulo  $\beta_{SQ}$  referido al cero Doppler).
- Rotación de la Tierra.

El procesamiento se realiza en el sistema natural de coordenadas del radar, en el plano asociado a la dirección del alcance. La representación de una imagen de radar sobre la superficie de la Tierra requiere que los arcos de alcance constante sean proyectados sobre la elevación de la superficie de la Tierra en cada punto (Fig.87).

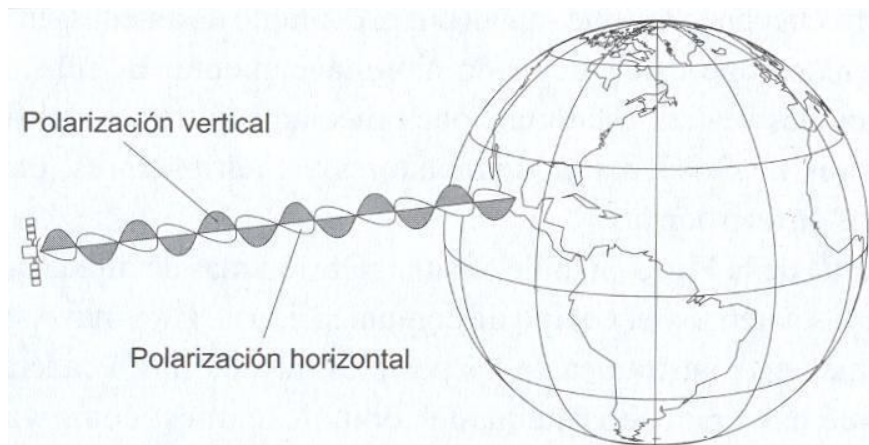


**Figura 87.** Compresión de un Reflector Puntual o Enfoque.

Como ejemplo podemos mencionar que los datos de RADARSAT (satélite canadiense) se presentan comúnmente proyectados sobre un modelo elipsoidal del nivel del mar. Mediante la inversión de la ecuación del radar y a través del proceso de calibración de los datos, se puede separar la información burda (cruda) de la geometría de la imagen, de la información relativa a la imagen del radar.

Otro aspecto a tener en cuenta en el procesamiento de SAR es la polarización, es decir, la orientación del campo eléctrico de la radiación transmitida y recibida. Si el vector campo eléctrico está en dirección horizontal con respecto al plano de la tierra, se dice que la polarización es horizontal, en el caso contrario, la polarización es vertical (Fig.88).



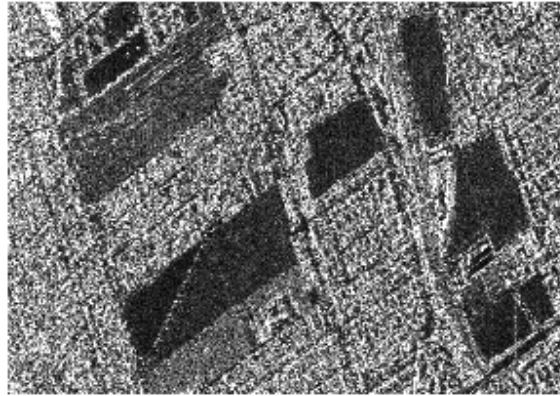


**Figura 88.** Tipos de polarización.

En la interacción sobre el terreno, la radiación sufre una rotación del vector campo eléctrico y puede resultar que la señal recibida tenga una componente vertical y otra horizontal. Existen cuatro combinaciones de polarización de emisión y recepción: HH, HV, VH y VV todas ellas pertenecen al tipo lineal. La radiación emitida por SAR es VV, el uso de diferentes modos de polarización garantiza una mayor adquisición de datos y una mejor resolución espacial.

#### **A.16 Ruido Speckle.**

La imagen generada por el sistema SAR se ve afectada por la interferencia de las señales incidente y reflejada por la superficie. El ruido o moteado Speckle proviene de la adición coherente de los retornos individuales producido por los elementos presentados en cada celda de resolución. Dentro de cada píxel, existen muchos elementos dispersos y la suma de la respuesta de cada uno de ellos determina el valor de gris del píxel (véase características de la imagen SAR “en proceso”). El alto nivel de ruido Speckle causa que las imágenes del SAR se vean granuladas, como puede verse en la figura 89, esto es por lo cual son muy difíciles de analizar e interpretar.



**Figura 89.** Imagen sin filtrar, obtenida por el sensor E-SAR sobre los alrededores de Múnich, Alemania.

Henderson y Lewis, 1998, consideran el moteado Speckle como una característica inherente a las imágenes de radar, y estipulan la existencia de dos tipos de texturas: la de la propia escena y la de la varianza de la imagen, conocida como speckle, debido al sistema de obtención de la propia imagen. Por lo tanto, se debe distinguir entre la “textura de la escena” que debe ser contemplada como la variación espacial de los patrones de reflectividad, y la “textura de la imagen” que representa la variación espacial de la radiometría captada por un sistema parcialmente coherente como el SAR.

La señal emitida por el sensor se transmite en fase, de forma coherente sin producir interferencias hasta que interacciona con el objeto, entonces deja de estar en fase y las ondas producen interferencias que generan píxeles claros y oscuros denominados “ruido de moteado o speckle”. El speckle debe ser eliminado antes de proceder a la utilización de los datos.

Es crucial el orden de aplicación de los algoritmos en las imágenes de radar dado, que cualquier proceso aplicado a una imagen antes de reducir el speckle, genera un ruido que se incorpora a la propia imagen, produciendo una degradación de la misma. El speckle no puede ser nunca eliminado totalmente, pero si reducido significativamente. Por ello, los filtros de speckle tienen como objetivo dicha reducción, procurando conservar las características espaciales y las estructuras lineales de la escena (García *et al.*, 2003).

### A.17 Estimadores.

La visualización del histograma de frecuencias de la imagen proporciona información cualitativa sobre el speckle de la misma; mientras que los ratios (relaciones) SNR (Relación señal/ruido, "Signal to Noise Ratio") y Neq (Número equivalente de vistas simples) proporcionan información cuantitativa; cuanto mayor sea el aumento de la relación SNR o del índice Neq, mejor será la actuación del filtro (Chakraborty & Sharma, 1997).

Normalmente se representa el speckle como un proceso aleatorio similar a una modulación multiplicativa de la reflectividad de la imagen. Este proceso multiplicativo es estadísticamente independiente del proceso aleatorio de la reflectividad (Henderson & Lewis, 1998). Por lo tanto, este modelo multiplicativo se ajusta mejor en áreas que presentan una reflectividad media constante sobre una gran superficie. El parámetro SNR (Signal to Noise Ratio), se define como el cociente entre la media de los niveles digitales y su desviación típica, es decir:

$$SNR = \frac{\bar{x}}{\sigma_x} \quad \text{Ecuación 14.}$$

La variación de este índice y, en concreto el aumento de su valor, proporciona una estimación sobre la eficacia de actuación de los filtros de reducción de speckle (Paudyal & Aschbacher, 1993 a, b), aunque el aumento del SNR no debe ser el único medio para evaluar la actuación de un filtro, ya que las escenas radar contienen áreas heterogéneas, estructuras lineales y pequeñas dispersiones puntuales que deben mantenerse y que resulta difícil evaluar cuantitativamente.

Por eso, la inspección visual de una imagen da con frecuencia la mejor impresión sobre la actuación de un determinado filtro (Wooding *et al.*, 1995). Se define como Número Equivalente de Vistas (Neq), o ENL (Equivalent Number of Looks), para una región homogénea de una imagen, como la relación entre la media al cuadrado y la varianza, ambas estimadas a partir de los datos de la imagen expresados en potencia ( $s^0$ ) radiométrica (Laur *et al.*, 1996). El Neq está relacionado con el número de vistas simples estadísticamente independientes y se expresa como:

$$Neq = \frac{Media^2}{Varianza} \quad \text{Ecuación 15.}$$

### A.18 Filtros de Reducción de Speckle.

Entre los numerosos filtros de reducción de speckle, se va a analizar el comportamiento de los filtros específicos de Frost, Gamma-MAP, Lee-Sigma y Región Local que han demostrado su interés en el análisis de distintos tipos de cubiertas vegetales (Paudyal & Aschbacher, 1993 a, b).

- Filtro de la región local.

Este filtro (Nagao & Matsuyama, 1979) divide la ventana móvil en 8 regiones locales basadas en su posición angular (E, W, N, S, NW, EN, SE y SW) y calcula la varianza en cada una de las regiones como:

$$Varianza = \frac{\sum (ND_{x,y} - Media)^2}{n-1} \quad \text{Ecuación 16.}$$

El algoritmo compara las 8 regiones que rodean al píxel considerado, y su valor es sustituido por el de la media de los niveles digitales de los píxeles de la región con menor varianza, es decir, la región más uniforme. Se supone que una región con varianza baja tiene sus píxeles mínimamente afectados por la interferencia de la señal, y su nivel digital medio es muy similar al del píxel considerado.

- Filtros Lee y Sigma.

Los filtros Lee y Sigma (Lee, 1981) utilizan la distribución estadística de los niveles digitales de la ventana móvil definida por el usuario para estimar cuál debe ser el del píxel considerado.

El filtro de Lee se basa en suponer que la media y la varianza del píxel considerado son iguales a la media y la varianza local de los píxeles de la ventana móvil definida por el usuario, según las siguientes expresiones:

$$ND_s = \bar{V} + K(ND_e - \bar{V}) \quad \text{Ecuación 17.}$$

Dónde:

$ND_s$ = Nivel Digital de salida.

$ND_e$ = Nivel Digital de entrada.

$\bar{V}$  = Media de los Niveles Digitales de los píxeles de la ventana móvil.

$$K = \frac{Var(x)}{(\bar{V})^2 \sigma^2 + Var(x)} \quad \text{Ecuación 18.}$$

Siendo:

$$Var(x) = \frac{Var(V) + (\bar{V})^2}{\sigma^2 + 1} - (\bar{V})^2 \quad \text{Ecuación 19.}$$

Dónde  $Var(V)$ = es la varianza de la ventana móvil.

- Filtro de Frost.

Se trata de un algoritmo (Lopes *et al.*, 1990) basado en el error medio cuadrático mínimo que se adapta a las estadísticas locales de la imagen, las cuales proporcionan el peso de los parámetros que provocan la respuesta del filtro (ventana móvil). Este algoritmo asume que el ruido es multiplicativo con estadísticas estacionarias, la expresión utilizada en el cálculo del filtro es:

**Ecuación 20.**

$$ND = \sum_{n \times n} K \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha|t|}$$

Siendo:

$K$ = Constante de normalización.  
 $\bar{I}$ = Media local.  
 $\sigma$ = Varianza loca.

$\bar{\sigma}$ = Coeficiente de variación de la imagen:  
 $|t| = |x - x_0| + |y - y_0|$   
 $N$ = Tamaño de la ventana móvil.

$$\alpha = \frac{4}{n \cdot \bar{\sigma}^2} \cdot \frac{\sigma^2}{\bar{I}^2}$$

**Ecuación 21.**

- Filtro Gamma-MAP.

El filtro de máximo a posteriori (MAP) (Frost *et al.*, 1982) intenta estimar el nivel digital original del píxel, que se asume debe estar entre la media local y el nivel digital del píxel degradado (actual). La lógica del MAP maximiza la función de densidad de probabilidad a posteriori respecto a la imagen original.

El algoritmo para la aplicación de este filtro se basa en la siguiente expresión:

$$\hat{I}^3 = \bar{I}\hat{I}^2 + \sigma(\hat{I} - ND) = 0$$

**Ecuación 22.**

Siendo:

$\hat{I}$  = Valor buscado  
 $\bar{I}$  = Media local  
 $ND$  = Nivel Digital de entrada (inicial).  
 $\sigma$  = Varianza de la imagen original.

### **A.19 Concepto de Vistas Múltiples.**

Se conoce que el ruido speckle no es Gaussiano, como ocurre con el ruido de imágenes ópticas. Otro método que es usado para reducir este ruido es la generación de varias “vistas” o *looks* a partir del mismo conjunto de pulsos crudos durante el proceso de generación de la imagen.

Esta técnica se denomina *Proceso Multilook*, consiste en separar la muestra utilizada para la apertura sintética completa en varios subconjuntos adyacentes.

Cada uno de estos conjuntos se utiliza para formar una imagen separada llamada *look*. Cada *look* representa una observación independiente de la misma escena. El promedio, píxel a píxel, de cada uno de ellos genere una imagen *Multilook* que posee menor ruido *speckle*, sacrificando resolución espacial (Oliver & Quegan, 1998). Luego, la imagen procesada en  $n$  looks es el resultado de realizar un promedio con  $n$  de estas imágenes independientes.

Considerando la coordenada  $(i, j)$ , sobre la cual se observan  $n$  valores complejos  $\{z(1), \dots, z(n)$  cada uno de ellos provenientes de un looks de la imagen. Entonces la imagen final  $I$ , en la coordenada  $(i, j)$ , llamado  $I_k = |z(k)|^2$ ,  $k = 1, \dots, N$ .

$$I = \frac{I_1 + \dots + I_n}{n} \quad \text{Ecuación 23.}$$

Como se ve en el siguiente capítulo el modelo estadístico para el ruido *speckle* depende del número de looks. Si esta información no está disponible, puede aproximarse por el *número equivalente de looks* (ENL) que se define como:

$$ENL = \frac{m^2}{v} \quad \text{Ecuación 24.}$$

Dónde  $m$  y  $v$  corresponden a la media y a la varianza calculadas con los valores de intensidad de una muestra de píxeles sobre un área uniforme de la imagen. El equipo GLOBE SAR del Centro Canadiense de Percepción Remota, posee su propio concepto de observaciones múltiples, el cual es el siguiente:

A partir de una sola observación, se utilizan todas las reflexiones recibidas desde un cierto punto en el terreno (o una región en particular) para crear una sola imagen, esta contendrá moteado, pero tendrá la mejor resolución posible. Se pueden formar sub-imágenes independientes (observaciones) de la misma área mediante el procesamiento digital de los datos del SAR.

Para esto se utilizan sub-conjuntos de las señales reflejadas, estas sub-imágenes se promedian entre sí para crear una sola imagen multi-observación, por lo tanto la imagen resultante tiene menor resolución, pero también tiene menos moteado. El número de vistas en el sistema SAR del ERS-2, puede variar de 3 a 4 según el usuario.

#### **A.20 Ventajas y limitantes del SAR.**

- **Ventajas:**

- A. Contribuyen en gran medida en la comprensión y entendimiento del medio ambiente.
- B. Independencia de la luz solar.
- C. Independencia del clima.
- D. La interpretación de imágenes SAR tienen múltiples aplicaciones.

- **Limitantes:**

- A. Tiene la desventaja de que son muy difíciles de analizar e interpretar.
- B. Mucho Ruido (Speckle).
- C. Poco contraste.
- D. Apariencia granulada.
- E. La banda C usada por el SAR del ERS-2 con frecuencia de 5.3 GHz, posee un grado considerable de ruido Speckle, en comparación con otras bandas.
- F. Para adquirir imágenes del ERS-2 SAR, es necesario solicitarlas con mucha antelación, a las distintas agencias espaciales.
- G. El SAR limita su operación a una pequeña fracción de su órbita debido a la gran cantidad de energía que necesita para operar.

Tiempos de operación:

<12 minutos por órbita en total; < 10 minutos por órbita en su paso descendente;

< 4 minutos por órbita con eclipse; Máximo número de cambios on/off (encendido/apagado) 6 por órbita.