

**Detección de derrames de hidrocarburos e información asociada al evento  
utilizando imágenes satelitales e inteligencia artificial priorizando áreas sobre  
la Cuenca Pacífica Colombiana**



Santiago López Dorado

Víctor Fabián Ordóñez Chicaiza

Corporación Universitaria Comfacaucá - Unicomfacaucá

Facultad de Ingenierías

Popayán, Colombia

2021

**Detección de derrames de hidrocarburos e información asociada al evento  
utilizando imágenes satelitales e inteligencia artificial priorizando áreas sobre  
la Cuenca Pacífica Colombiana**



Santiago López Dorado

Víctor Fabián Ordóñez Chicaiza

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero de Sistemas

Director:

Julián Fernando Muñoz Ordóñez

Codirector:

Cristian Camilo Muñoz Ordóñez

Corporación Universitaria Comfacaucá - Unicomfacaucá

Facultad de Ingenierías

Popayán, Colombia

2021

Nota de aceptación

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la  
Corporación Universitaria Comfacaucá - Unicomfacaucá para optar al título de Ingeniero  
de Sistemas.

---

Ingeniero

---

Ingeniero

Popayán-Cauca, 29/09/2021

## Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado especialmente a Dios, por ser el inspirador y escalar principal para continuar en este largo proceso de formación profesional y así obtener este título profesional de ingenieros de sistemas.

A nuestros padres, por brindarnos ese apoyo cuando más lo necesitábamos, por el amor de padres, por el apoyo moral, por el trabajo y sacrificio de todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos.

## Agradecimientos

Agradecemos a Dios por la vida que nos ha ofrecido, por ser el guía de nuestras vidas en este largo trayecto de formación como profesionales, por brindarnos fortaleza en aquellos momentos de debilidad.

Gracias a nuestros padres: Luis Ordoñez y Alba Pomeo; y Orlando López y Maricela Dorado, por ser los principales promotores de nuestras vidas, por confiar en nuestras expectativas, por los consejos que nos han brindado, por los valores y principios que nos han inculcado desde nuestra formación como profesionales y a nivel personal.

Agradecemos a nuestros docentes de la Corporación Universitaria ComfacaUCA UnicomfacaUCA sede Popayán Cauca, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestras carreras universitarias, de manera especial al Ingeniero Julián Muñoz Ordóñez director de nuestro trabajo de grado quien ha guiado con su paciencia, conocimiento y rectitud como docente en este paso fundamental para nosotros como profesionales e igualmente al ingeniero Camilo Muñoz Ordóñez quien fue el codirector de nuestro trabajo de grado e igualmente cumplió un papel principal para la realización de este proyecto mediante el acompañamiento de la institución gubernamental DIMAR.

Nuevamente gracias por su colaboración a todos.

## Tabla de contenidos

|                                                     |      |
|-----------------------------------------------------|------|
| Lista de figuras.....                               | xi   |
| Lista de tablas .....                               | xiii |
| Resumen.....                                        | xiv  |
| Abstract .....                                      | xv   |
| Capítulo 1: Introducción .....                      | 16   |
| 1.1.    Formulación del problema .....              | 16   |
| 1.2.    Justificación .....                         | 19   |
| 1.3.    Objetivos .....                             | 22   |
| 1.3.1. Objetivo general.....                        | 22   |
| 1.3.2. Objetivos específicos .....                  | 22   |
| 1.4.    Organización del documento .....            | 23   |
| Capítulo 2: Marco de referencia .....               | 25   |
| 2.1.    Estado del arte.....                        | 25   |
| 2.2.    Marco contextual .....                      | 37   |
| 2.3.    Marco teórico .....                         | 38   |
| 2.3.1. Percepción remota satelital.....             | 38   |
| 2.3.2. Sensores satelitales remotos .....           | 38   |
| 2.3.3. Tipos de satélites .....                     | 39   |
| 2.3.3.1. Satélites activos.....                     | 40   |
| 2.3.3.2. Satélites pasivos .....                    | 40   |
| 2.3.3.2.1. Clasificación de satélites pasivos.....  | 41   |
| 2.3.3.2.1.1. Exploradores de barrido y empuje ..... | 41   |
| 2.3.3.2.1.2. Radiómetros de microondas.....         | 42   |
| 2.3.3.2.1.3. Satélites de radar de apertura .....   | 43   |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.4. Satélites Ópticos y de Radar.....                                      | 44 |
| 2.3.5. Tipos de resoluciones de los satélites ópticos y de SAR.....           | 45 |
| 2.3.5.1. Resolución espectral .....                                           | 45 |
| 2.3.5.2. Resolución radiométrica .....                                        | 46 |
| 2.3.5.3. Resolución temporal .....                                            | 46 |
| 2.3.5.4. Resolución espacial.....                                             | 46 |
| 2.3.6. Biota acuática .....                                                   | 48 |
| 2.3.7. ¿Por qué es perjudicial un derrame de hidrocarburo? .....              | 48 |
| 2.3.8. SENTINEL-1 .....                                                       | 49 |
| 2.3.9. Imágenes de derrame de petróleo.....                                   | 50 |
| 2.3.10. Aprendizaje profundo (Deep Learning) .....                            | 51 |
| 2.3.11. Inteligencia artificial (Artificial Intelligence) .....               | 51 |
| 2.3.12. Redes neuronales convolucionales (Convolutional neural networks)..... | 52 |
| 2.3.15. Visión por computadora (Computer Vision).....                         | 54 |
| 2.3.16. Algoritmo de clasificación de imágenes satelitales.....               | 54 |
| 2.3.17. Segmentación por instancia.....                                       | 57 |
| 2.3.18. Segmentación semántica .....                                          | 59 |
| 2.3.19. Métricas para la evaluación de la segmentación de imágenes .....      | 60 |
| 2.3.17.1. Precisión.....                                                      | 61 |
| 2.3.17.2. Estabilidad.....                                                    | 61 |
| 2.3.17.3. Eficacia .....                                                      | 62 |
| 2.3.17.4. Comparación de algoritmos .....                                     | 62 |

|                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4. Marco legal .....                                                                                                                                                                                                 | 63 |
| 2.4.1. Convenio para la protección y el desarrollo del medio marino en la región del gran caribe (ley 56 de diciembre 23 de 1987).....                                                                                 | 63 |
| 2.4.2. Protocolo relativo a la cooperación para combatir los derrames de hidrocarburos en la región del gran caribe (ley 56 de diciembre 23 de 1987).....                                                              | 64 |
| 2.4.3. Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos, 1990 (oprc 90) (ley 885 de 2004) .....                                                                 | 64 |
| 2.3.4. Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos, 1990 (oprc 90) (ley 885 de 2004) .....                                                                 | 64 |
| 2.3.5. Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos, 1990 (oprc 90) (ley 885 de 2004) .....                                                                 | 65 |
| 2.4.6. Acuerdo sobre la cooperación regional para el combate contra la contaminación del pacífico sudeste por hidrocarburos y otras sustancias nocivas en casos de emergencia (ley 45 del 26 de febrero de 1985) ..... | 65 |
| 2.4.7. Convenio internacional para prevenir la contaminación ocasionada por los buques marpol 73/78 (ley 12 de 1981) .....                                                                                             | 66 |
| Capítulo 3: Clasificación de imágenes de radar de apertura sintética .....                                                                                                                                             | 67 |
| 3.1. Metodología .....                                                                                                                                                                                                 | 67 |
| 3.2. Etapas .....                                                                                                                                                                                                      | 68 |
| 3.2.1. Etapa 1: Identificación .....                                                                                                                                                                                   | 68 |
| 3.2.1.1. Observación.....                                                                                                                                                                                              | 69 |
| 3.2.1.2. Identificación.....                                                                                                                                                                                           | 69 |
| 3.2.1.3. Desarrollo.....                                                                                                                                                                                               | 70 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1.4. Pruebas .....                                                             | 73 |
| 3.2.1. Etapa 2: Desarrollo del sistema.....                                        | 73 |
| 3.2.1.1. Observación.....                                                          | 74 |
| 3.2.2.2. Identificación .....                                                      | 75 |
| 3.2.2.3. Desarrollo.....                                                           | 75 |
| 3.2.2.4. Pruebas .....                                                             | 78 |
| 3.2.2. Etapa 3: Evaluación.....                                                    | 79 |
| 3.2.3.1. Observación .....                                                         | 79 |
| 3.2.3.2. Identificación .....                                                      | 79 |
| 3.2.3.3. Desarrollo.....                                                           | 79 |
| 3.2.3.4. Pruebas .....                                                             | 80 |
| Capítulo 4: Resultados y análisis .....                                            | 81 |
| 4.1. Detección de derrames de hidrocarburos a través de imágenes satelitales ..... | 81 |
| 4.2. Detección de la línea costera.....                                            | 87 |
| Capítulo 5: Conclusiones y trabajos a futuro .....                                 | 95 |
| 5.1. Conclusiones .....                                                            | 95 |
| 5.2. Trabajos a futuro .....                                                       | 97 |
| Referencias.....                                                                   | 98 |

## Lista de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Análisis del estudio con indicaciones de estrés significativos en la vegetación y humedales .....                                                                                                                                   | 34 |
| Figura 2. Tipos de sensores satelitales.....                                                                                                                                                                                                  | 39 |
| Figura 3. Funcionamiento de satélites pasivos. ....                                                                                                                                                                                           | 40 |
| Figura 4: Trayectoria de los exploradores de recorrido. ....                                                                                                                                                                                  | 42 |
| Figura 5. Visualización de imágenes SAR con filtro mediana o reducción de ruido. ....                                                                                                                                                         | 44 |
| Figura 6. Imagen óptica de satélite Landsat 5.....                                                                                                                                                                                            | 47 |
| Figura 7. Derrame de hidrocarburo en zona acuática. ....                                                                                                                                                                                      | 49 |
| Figura 8. Imágenes satelitales de derrames de petróleo con mareas negras. ....                                                                                                                                                                | 50 |
| Figura 9. Diagrama de la arquitectura Lenet.....                                                                                                                                                                                              | 53 |
| Figura 10. Imagen de etiqueta.....                                                                                                                                                                                                            | 58 |
| Figura 11. Imagen con máscaras de objetos en blanco y negro.....                                                                                                                                                                              | 58 |
| Figura 12. Imagen original.....                                                                                                                                                                                                               | 60 |
| Figura 13. Imagen resultante de la máscara del proceso de segmentación semántica.....                                                                                                                                                         | 60 |
| Figura 14. Muestreo de colección de datos recopilados. ....                                                                                                                                                                                   | 70 |
| Figura 15. Imagen satelital del Sentinel-1 preprocesada. ....                                                                                                                                                                                 | 71 |
| Figura 16. Recortes de áreas de interés, clases: continental, oceánica y derrames.....                                                                                                                                                        | 71 |
| Figura 17. Categorización de zonas según el tipo de clases. ....                                                                                                                                                                              | 72 |
| Figura 18. Fragmento de código del sistema de detección de derrames de hidrocarburos en el océano mediante la utilización de imágenes SAR .....                                                                                               | 74 |
| Figura 19. Diagrama de flujo del sistema desarrollado para la detección de derrames de hidrocarburos en el océano. ....                                                                                                                       | 77 |
| Figura 20. Diagrama de clases del sistema desarrollado para la detección de derrames de hidrocarburos en el océano. ....                                                                                                                      | 78 |
| Figura 21. Imagen satelital de derrame de hidrocarburo cercano a la costa. ....                                                                                                                                                               | 82 |
| .....                                                                                                                                                                                                                                         | 83 |
| Figura 22. Imagen satelital clasificada.....                                                                                                                                                                                                  | 83 |
| Figura 23. Imagen satelital con clasificación blanco y negro (binaria). ....                                                                                                                                                                  | 84 |
| El rendimiento del entrenamiento de la red neuronal convolucional fue medido a través de las métricas relacionadas con la función de pérdida (Loss) y la precisión (Accuracy), los resultados del proceso son mostrados en la Figura 24. .... | 84 |
| Figura 24. Evaluación de las métricas de pérdida y precisión en el entrenamiento. ....                                                                                                                                                        | 85 |
| Figura 25. Visualización de archivo vectorial sobre la imagen satelital tipo ráster. ....                                                                                                                                                     | 86 |
| Figura 26: imagen que maximiza los valores digitales contenidos en los resultados de los procesos de clasificación de las imágenes Sentinel-1.....                                                                                            | 88 |
| Figura 27. Imagen de detección de línea de costa. ....                                                                                                                                                                                        | 89 |
| Figura 28. Visualización de la línea de costa en imagen satelital.....                                                                                                                                                                        | 89 |

|                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 29. Ejemplos de dos clasificaciones de línea costera para el año 2019 y 2020.....                                                                                                                                                  | 90  |
| Figura 30. Detección de zonas de erosión costera sobre una región perteneciente a la ciudad de Cartagena (Colombia).....                                                                                                                  | 91  |
| Figura 31. Sistema de detección de acreción o erosión de la línea de costa.....                                                                                                                                                           | 92  |
| Figura 32. Áreas erosionadas sobre una región de Cartagena (Colombia).....                                                                                                                                                                | 93  |
| Figura 33. Áreas de acreción y erosión costera en Cartagena (Colombia).....                                                                                                                                                               | 94  |
| Figura 34. Certificado de la Dirección Nacional de Derechos de Autor relacionado con la creación de un Framework llamado OilSpill Detection para la detección de derrames de hidrocarburo en zonas de mar abierto. ....                   | 102 |
| Figura 35. Certificados de participación como ponentes en el evento Mesasur Pacífico 2021-1 con los resultados del proyecto de investigación.....                                                                                         | 103 |
| Figura 36a. Transferencia de conocimiento al grupo de investigación del Área de Oceanografía Operacional (AROPE) perteneciente a la Dirección General Marítima de Colombia de los resultados y avances del proyecto de investigación..... | 104 |
| Figura 36b. Transferencia de conocimiento al grupo de investigación del Área de Oceanografía Operacional (AROPE) perteneciente a la Dirección General Marítima de Colombia de los resultados y avances del proyecto de investigación..... | 105 |
| .....                                                                                                                                                                                                                                     | 106 |
| Figura 36c. Transferencia de conocimiento al grupo de investigación del Área de Oceanografía Operacional (AROPE) perteneciente a la Dirección General Marítima de Colombia de los resultados y avances del proyecto de investigación..... | 106 |
| Figura 36d. Transferencia de conocimiento al grupo de investigación del Área de Oceanografía Operacional (AROPE) perteneciente a la Dirección General Marítima de Colombia de los resultados y avances del proyecto de investigación..... | 107 |

### **Lista de tablas**

Tabla 1. Caracterización de las clases definidas (Detección de derrames de hidrocarburos)..... 82

Tabla 2. Caracterización de las clases escogidas para el proceso de detección de línea de costa 87

## **Resumen**

El ambiente marítimo es uno de los principales recursos de diversos países y regiones, debido a que ofrece diversidad de flora y fauna, lo cual genera soberanía alimentaria a diferentes regiones, otro beneficio que ofrece océano es la intercomunicación como canal de transporte para diversos comercios e igualmente se puede mencionar las explotaciones de minerales y materiales fósiles que se encuentran en el océano. El petróleo es un aceite mineral derivado a la materia orgánica. En la actualidad el petróleo es un escalón principal de la economía de algunos países. Debido a que el planeta tierra está cubierto aproximadamente por un 71% de agua, generando que la mayoría los pozos de petróleo se encuentran en el océano, debido a esto es usual que encuentren plantas de extracción de este recurso en el océano, pero durante el proceso de extracción y transporte hay la posibilidad de que haya un siniestro marítimo generando consecuencias directas al ecosistema e igualmente afectando la economía de las regiones cercanas del siniestro.

Diferentes organizaciones gubernamentales e instituciones educativas se preocupan por salvaguardar el medio ambiente marítimo, lo cual ha generado diversas alianzas para así cumplir este fin primordial, por lo tanto, se puede mencionar que la autoridad marítima DIMAR en acompañamiento de la corporación universitaria Unicomfauca busca automatizar la detección de derrames de petróleo en el océano priorizando la cuenca del Pacífico.

## **Abstract**

The maritime environment is one of the main resources of various countries and regions, because it offers diversity of flora and fauna, which generates food sovereignty to different regions, another benefit offered by the ocean is the intercommunication as a transport channel for various shops and we can also mention the exploitation of minerals and fossil materials that are in the ocean. Petroleum is a mineral oil derived from organic matter. Today, oil is a major step in the economy of some countries. Since the planet earth is covered by approximately 71% of water, generating that most of the oil wells are in the ocean, because of this it is usual to find extraction plants of this resource in the ocean, but during the extraction and transport process there is the possibility that there is a maritime accident generating direct consequences to the ecosystem and also affecting the economy of the nearby regions of the disaster.

Different governmental organizations and educational institutions are concerned with safeguarding the maritime environment, which has generated various alliances to fulfill this primary purpose, therefore, it can be mentioned that the maritime authority DIMAR in accompaniment of the university corporation Unicomfauca seeks to automate the detection of oil spills in the ocean prioritizing the Pacific basin.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 16 de 107        |

## Capítulo 1: Introducción

### 1.1. Formulación del problema

El petróleo es el hidrocarburo con mayor demanda en el mercado a nivel mundial, proveniente de origen fósil y derivado a las transformaciones que presentan los organismos o materias orgánicas las cuales están en estado de descomposición al interior de la tierra [1], es extraído mediante procedimientos o estrategias según las normas del estado donde se realiza el proceso. Dicho lo anterior, se puede identificar que el petróleo es una fuente de ingresos principal que mantiene la economía de diversos países, sus productos derivados son parte de las principales actividades económicas que se utilizan en la actualidad, del tal modo, varios productos o artículos domésticos están fabricados con compuestos del petróleo, igualmente a nivel industrial es ampliamente utilizado.[2]

Otras grandes reservas de petróleo se encuentran ubicadas en los océanos, lo que ha provocado, que las empresas petroleras construyan plataformas para la extracción del crudo, también conocido como “oro negro”, sin embargo, el océano también se convierte en un canal de transporte marítimo principal para los diferentes países y sus economías, razón por la cual es utilizado con frecuencia para el transporte del petróleo hacia las plantas procesadoras, también hay que resaltar que en el océano se encuentran grandes riquezas marítimas relacionadas a la flora y fauna, lo cual favorece a la soberanía

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 17 de 107        |

alimentaria en los territorios[3], debido a esto se concluye que el océano se constituye en factor principal para la economía de los países y en general para la conservación del medio ambiente [4]

Conociendo lo anterior, hay que subrayar los riesgos y consecuencias que se pueden generar en la extracción y transporte del petróleo a través del canal marítimo, existe la posibilidad de ocurrencias de accidentes durante estos procesos que derivan en el derrame del crudo sobre el océano [5], provocando en algunos casos desastres ambientales que afectan el ecosistema marítimo, por otra parte, estos accidentes también generan afectaciones económicas en los territorios de cada país involucrado. Estos accidentes suceden con mayor frecuencia en zonas fluviales o marítimas, generando consecuencias directas sobre los ambientes acuáticos, provocando afectación en la cadena de alimentación oceánica, dando como primer perjudicado al **fitoplancton**<sup>1</sup>, produciendo un fenómeno llamado **LISIS**, el cual comprende la ruptura de las membranas celular de las células, provocando posteriormente la muerte de estos organismos [6].

El fitoplancton es el principal escalón en la cadena trófica al nivel del mar, también hay que reconocer que estos organismos son sumideros de carbono marítimos, los cuales ayudan a equilibrar el CO<sub>2</sub> en el océano [7]. La afectación del fitoplancton durante la ocurrencia de estos desastres afecta indirectamente a los organismos como el zooplancton<sup>2</sup>, puesto que dichos organismos se alimentan de ellos [8]. Una disminución

<sup>1</sup> Fitoplancton: Son organismos autótrofos **de origen vegetal** que viven flotando en la columna de agua y cuya capacidad natatoria no logra superar la inercia de las mareas o las corrientes marítimas.

<sup>2</sup> Zooplacton: Son un tipo de plancton heterotrófico que van desde organismos microscópicos hasta grandes especies, que ecológicamente son un componente esencial de la cadena alimentaria.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>18</b> de <b>107</b> |

del fitoplancton obligaría a la migración del zooplancton a otros lugares del mar con el fin de buscar su alimento, provocando consecuencias económicas y sociales a la población pesquera de la región, los cuales se verían obligados a explorar otros sitios de pesca dando como resultado gastos no planeados. Igualmente se vería afectado las costas turísticas debido a la contaminación del derrame [9]

Diversas investigaciones han direccionado soluciones enfocadas en la detección, manejo y tratamiento de los desastres naturales relacionados con el derrame de hidrocarburos en el océano [10]. Las empresas como Dastec [11], el Instituto de ingeniería y transporte amariles S.A.S. [12] y Orbital EOS [13] ofrecen diversos servicios y productos, dedicados a la detección de derrames en el océano, mediante la capacitación y empleo de herramientas para gestión de los siniestros marítimos derivados de los derrames de hidrocarburos. La mayoría de las herramientas utilizadas durante estos procesos están basadas en información satelital, siendo el principal insumo el Satélite de Radar Sentinel-1. También se emplean sensores electrónicos capaces de detectar derrames de hidrocarburos con limitaciones en el área de cobertura, a lo largo de estos procedimientos se debe tener una capacitación previa en el uso estas herramientas tecnológicas e igualmente preparación de metodologías para la detección de los derrames. Estos servicios y productos nombrados anteriormente poseen un costo que las empresas o entidades gubernamentales deben asumir, además, la ubicación de los dispositivos genera

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 19 de 107        |

información puntual, por lo que no podrían ser colocados en mar abierto. Por otra parte, las comunidades académica y científica han realizado avances en las técnicas de detección de derrames de hidrocarburos, utilizando imágenes satelitales [14], creación de dispositivos para medición de contaminación marítima [15], sin embargo, no hay desarrollos disponibles de acceso libre a través de la red [16]. La Dirección General Marítima (DIMAR) encargada de salvaguardar la vida marítima en el territorio colombiano y otras entidades asociadas a ella, buscan continuamente la producción de herramientas y algoritmos que les faciliten los procesos de detección y reconocimiento de diversas características que ocurren en el océano, por ejemplo, la detección automatizada y confiable de los derrames de hidrocarburos son una prioridad para el Centro de Investigación. La presente investigación pretende resolver la siguiente pregunta: ¿Es posible reconocer de forma automatizada derrames de hidrocarburos en zonas de mar abierto utilizando información satelital y redes neuronales convolucionales?

## **1.2. Justificación**

Los derrames de hidrocarburos son la principal amenaza para el entorno marítimo y para las economías de diferentes países. El océano ofrece grandes riquezas acuáticas, lo que favorece a la soberanía alimentaria de las regiones, además, se destaca su función primordial para la economía como medio de transporte, usualmente utilizado para la

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>20</b> de <b>107</b> |

exportación de diversos productos, incluyendo el petróleo. Los accidentes relacionados con los derrames de petróleo suceden con mayor frecuencia en zonas fluviales o marítimas, generando consecuencias directas al entorno afectado, provocando impactos en la cadena alimenticia del océano, dando como primer damnificado al fitoplancton debido a las secuelas de la contaminación, ocasionándole una reacción molecular llamada LISIS. Lo anterior trae consigo una afectación indirecta sobre el zooplancton, pues la escasez del fitoplancton y la contaminación del petróleo obligarán a su migración en busca de su alimento produciendo escases en peces y posteriormente viéndose afectados los pesqueros de la región [17]. Los derrames de hidrocarburos son una de las principales fuentes de contaminación del océano, provocando repercusiones negativas al ecosistema y a la económica del mundo, dentro de todos los escenarios posibles, el más común y potencialmente peligroso son los derrames cercanos a las costas o bahías, en el cual hay mayor posibilidad de afectar a más especies marítimas y terrestres, los impactos se verán reflejados a corto y largo plazo en las zona costeras y oceánicas [18,19]. La identificación de derrames de petróleo en el océano es una prioridad para la conservación del hábitat marítimo, también es esencial la evaluación de propagación y el nivel de toxicidad del hidrocarburo, para así suministrar la planificación de decisiones óptimas, enfocadas a los siniestros marítimos producidos por derrames de petróleo y sus derivados. De esta manera, el uso de tecnología SAR ha tenido una amplia consideración para la detección y

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>21</b> de <b>107</b> |

evaluación de propagación de derrames de hidrocarburos en amplias zonas de mar abierto.

El Radar de Apertura Sintética (SAR) se percibe como la herramienta de teledetección más significativa para el examen, registro, documentación y propagación del aceite de las aguas oceánicas [20].

El satélite Sentinel-1 es usualmente utilizado durante las investigaciones de teledetección de siniestros marítimos debido a la inmunidad a la cobertura nubosa, proporcionando en todo momento imágenes de la parte continental y oceánica con una aceptable resolución espacial de 10m [21]. La elaboración de herramientas de uso libre, capacitadas en **identificación** derrames de petróleo y sus derivados en mar abierto, mediante la utilización de imágenes satelitales, provenientes de los satélites Sentinel-1 son un tema primordial e insumo importante para las entidades encargadas de la atención de dichas emergencias. De esta manera se espera que la solución propuesta en esta investigación contribuya y sea útil para las diversas instituciones con propósitos de salvaguardar el hábitat marítimo, entre las cuales se encuentra la Dirección General Marítima (DIMAR), que es la encargada de proteger el ecosistema marítimo en el territorio colombiano y que se encuentra en constantes investigaciones de modelos de teledetección y de simulación de propagación de derrames en el Océano Pacífico. El desarrollo de esta investigación constituirá un aporte significativo para la institución puesto que fomentará la alianza de estructuras gubernamentales (Estado) con comunidades académicas (Universidad),

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 22 de 107        |

generando a través de la transferencia de conocimiento y su apropiación combatir problemáticas relacionadas con los derrames de petróleo y sus derivados en el océano disminuyendo las amenazas y riesgos producidos por estos siniestros marítimos.

### **1.3.Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Construir un sistema para la detección de derrames de hidrocarburo utilizando imágenes satelitales ópticas y de radar junto con algoritmos de redes neuronales convolucionales para generar información relacionada al evento, priorizando regiones comprendidas en la Cuenca Pacífica Colombiana.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

1. Construir el conjunto de datos relacionado con derrames de hidrocarburos para la generación de un modelo de clasificación supervisada.
2. Construir un sistema de detección de derrames de hidrocarburo basado en imágenes satelitales y redes neuronales convolucionales para la generación de información asociada al evento.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>23</b> de <b>107</b> |

3. Evaluar el sistema de detección de derrames de hidrocarburos utilizando métricas de precisión como el coeficiente Kappa, estimación de errores y matriz de confusión relacionados a los procesos de clasificación.

#### **1.4. Organización del documento**

A continuación, se presenta la organización general del documento y un resumen de la información presentada en cada capítulo:

**Capítulo 1:** Introducción: En este capítulo se presenta el tema de investigación, la justificación, la pregunta de investigación que originó el proyecto, el objetivo general y objetivos específicos definidos inicialmente en el anteproyecto y finalmente la organización del documento.

**Capítulo 2:** Marco de referencia: En este capítulo se presenta los trabajos más significativos e innovadores que se han hecho alrededor de la detección de derrames de hidrocarburos utilizando imágenes satelitales e inteligencia artificial. Por otra parte, se explica cada uno de los conceptos y metodologías que se usarán en el desarrollo y las diferentes resoluciones que soportan y rigen su realización.

**Capítulo 3:** Metodología: En este capítulo se presenta el desarrollo desde la etapa inicial hasta la etapa de evaluación del sistema de detección de derrames de hidrocarburo

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>24</b> de <b>107</b> |

utilizando imágenes satelitales de radar junto con algoritmos de redes neuronales convolucionales. En todo este proceso se tuvo en cuenta la metodología del patrón de investigación iterativo.

**Capítulo 4:** En este capítulo se presenta los resultados más importantes del proyecto, tanto las métricas de evaluación del sistema como los productos derivados del mismo. Teniendo en cuenta que se utilizó el coeficiente kappa para la observación de su eficiencia e igualmente se midió la pérdida y la precisión del entrenamiento de la red neuronal.

**Capítulo 5:** Conclusiones y trabajos futuros: En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas al finalizar el proyecto e ideas que se esperan realizar en un trabajo a futuro.

**Capítulo 6:** Referencias: En este capítulo, se tiene las referencias bibliográficas de los artículos, libros, entre otros, consultados para la realización de la investigación

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>25</b> de <b>107</b> |

## **Capítulo 2: Marco de referencia**

En este capítulo, inicialmente se resaltan algunos de los proyectos más significativos que otros investigadores han realizado, posteriormente se explica de manera general el contexto en el cual se desenvuelve el presente proyecto, también se describen detalladamente los fundamentos teóricos y metodológicos que soportan este proyecto, y finalmente, en el marco legal.

### **2.1. Estado del arte**

A continuación, se presentan los resultados de una revisión sistemática, donde se usó el repositorio Scopus para obtener la metadata e información de todos los artículos relacionados con la palabra clave clasificación de derrames de hidrocarburos en el océano; con el objetivo de identificar el enfoque que se le está dando al desarrollo de este tipo de proyectos. Teniendo en cuenta la revisión realizada, a continuación, se presentan los artículos más relevantes en los cuales se utiliza la percepción remota como el principal enfoque para la solución del problema de clasificación, debido a que es el enfoque con mayor cantidad de autores e investigaciones.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 26 de 107        |

En 2018 los autores Orfanidis, et al.[22], plantearon que los derrames de petróleo representan una amenaza importante para los entornos oceánicos y costeros, por lo tanto, una detección automática y un sistema de monitoreo continuo comprenden una opción atractiva para minimizar el tiempo de respuesta de las operaciones relevantes, explica que se han realizado numerosos esfuerzos para alcanzar este tipo de soluciones mediante la explotación de una variedad de sistemas de detección, como el radar de apertura sintética (SAR) por satélite, que puede identificar derrames de petróleo sobre superficies marinas en cualquier condición ambiental y tiempo de funcionamiento, tales enfoques incluyen el uso de redes neuronales artificiales que identifican eficazmente las áreas contaminadas. El documento describe la aplicación de un enfoque que combina los méritos de una DCNN con imágenes SAR con el fin de proporcionar un sistema de identificación de derrames de petróleo totalmente automatizado. El modelo segmenta semánticamente las imágenes SAR de entrada en varias áreas de interés. Las investigaciones hasta el momento no presentan la generación de información relacionada con el evento detectado, sus desarrollos están netamente enfocados en la detección del derrame de hidrocarburo, razón por la cual este proyecto de investigación pretende generar nueva información asociada.

En el año 2019, Arellano-Verdejo [23], propone en su trabajo una nueva Red Neuronal Convolucional especializada en la clasificación automática de productos

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 27 de 107        |

satelitales de Espectro-radiómetro de Imagen de Resolución Moderada. La arquitectura propuesta ha demostrado una alta generalización al clasificar más de 250.000 imágenes con una precisión del 99,99%. La metodología diseñada también puede ampliarse, con otros tipos de imágenes, para realizar la detección de sargazo, derrames de petróleo, marea roja, etc.

En el año 2019, se publicó el artículo denominado “Oil Spill Identification from Satellite Images Using Deep Neural Networks”, publicado por Marios Krestenitis, et al. [24] el cual identifica que los derrames de petróleo constituyen una de las principales amenazas para el océano y el medio costero, por lo que se requiere un monitoreo eficiente y eficaz, el cual alerte sobre posibles derrames de petróleo para así afrontar los riesgos y amenazas producidos por el derrame. La teledetección a través de sensores SAR tiene un papel principal para este objetivo, ya que suministran imágenes de alta resolución donde se puedan diagnosticar posibles derrames de hidrocarburos. Se han investigado diferentes métodos para automatizar la identificación de derrames de hidrocarburos, entre esos procesos se encuentran la segmentación semántica mediante el despliegue de DCNN se puede ejercer con eficiencia en el campo de detección de derrames de petróleo, ya que este proporciona información útil sobre la escena contaminada. Además, la mayoría de los métodos emplean distintos conjuntos de datos que hacen que los resultados proporcionados no sean comparables. A partir de estos dos aspectos, la principal

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 28 de 107        |

contribución de este artículo es: analizar los algoritmos de segmentación semántica y desarrollar una base de datos común compuesta por imágenes SAR. Específicamente se llevaron a cabo experimentos exhaustivos y se centraron en la utilización de diversas arquitecturas DCNN para la detección de derrames de hidrocarburos a través de la segmentación semántica. También definen que los modelos implementados se entrenaron y evaluaron usando una base usual como conjunto de datos. En general, el modelo DeepLabv3 + obtuvo la mejor utilidad al informar con mayor precisión en término de IoU y alto tiempo de inferencia. La segmentación semántica de imágenes SAR comprende una tarea muy desafiante debido a la distinción in situ requerida entre los derrames de hidrocarburos. La complejidad del problema planteado fue considerablemente discutida y acompañada de las cifras relativas. Finalmente, comprobaron una comparación adicional de diversas arquitecturas de DeepLab confirmando la eficiencia del modelo DeepLabv3 + en comparación con objetivos anteriores. El conjunto de datos implementado se desarrolló para entrenar y evaluar el modelo de segmentación; también resaltar que con esta investigación dejan un antecedente importante, que se espera que contribuya significativamente a la aplicación eficaz de los monitores de derrames de hidrocarburos. En el futuro, los modelos puntuales entrenados en el conjunto de datos desarrollados se encapsulan en un marco más amplio para la detección de derrames y módulos de soporte de toma de decisiones. Por último, los enfoques de segmentación semántica pueden

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 29 de 107        |

exportarse a otros campos de investigación que implementan la teledetección, como las identificaciones de inundaciones o incendios, agricultura de precisión, etc. En esta dirección, el conjunto de datos de derrames de petróleo se puede utilizar adicionalmente para entrenar las estructuras sólidas de los modelos de segmentación DCNN utilizados, sobre una base de caso por caso.

En el año 2019, los investigadores Cantorna, et al. [25], concluyeron que las imágenes de radar de apertura sintética (SAR) son una valiosa fuente de información para la detección de derrames de petróleo marino. Para su análisis eficaz, es importante contar con algoritmos de segmentación que puedan delimitar posibles áreas de derrame de petróleo. La aplicación de clustering, regresión logística y algoritmos de redes neuronales convolucionales para la detección de derrames de petróleo en imágenes satelitales de Envisat y Sentinel-1. Además, su investigación reveló que los derrames de aceite grandes no se producen con frecuencia, por lo que la identificación de un píxel como aceite es relativamente poco frecuente. Se han empleado métricas basadas en curvas Precision–Recall porque son útiles para problemas con un desequilibrio en el número de muestras de las clases. Aunque los algoritmos de regresión logística y clustering pueden considerarse útiles para la segmentación de derrames de petróleo, la combinación de técnicas convolucionales y redes neuronales logra los mejores resultados con un tiempo de cómputo bajo. Se ha integrado una red neuronal convolucional en un sistema de apoyo

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>30</b> de <b>107</b> |

a la toma de decisiones con el fin de facilitar la toma de decisiones y el análisis de datos de posibles eventos de derrame de petróleo.

Otra investigación primordial para nombrar es “**Advanced synthetic aperture radar images for characterization of oil spills disaster in ocean using Daubechies analsys**” [26], publicado por los investigadores del Department of Computer Science and Engineering, Vels Institute of Science Technology & Advance Studies, Chennai, India en el año **2020**. El cual contiene investigaciones relacionadas con algoritmos para identificación de ocurrencia de derrames de petróleo en el océano, en los cuales identificaron la necesidad de caracterizar el tipo hidrocarburo derramado, por lo que es importante evaluar y planificar el proceso de restauración del siniestro marítimo producido por el derrame. Para la detección del tipo de hidrocarburo derramado se emplearon diversas técnicas de aprendizaje automático ya que era la prioridad para el grupo investigativo, por lo tanto, tomaron muestras de imágenes de satélite de tres tipos de derrames de hidrocarburos (petróleo, petróleo crudo y diésel) para así aplicar el aprendizaje automatizado y posteriormente realizar la clasificación del hidrocarburo derramado sobre el área afectada. Las tipologías basadas en el color, estadísticas, texturales y geográficas se extraen posteriormente de aplicar varios tipos de ondas para obtener las características relevantes para los parámetros físicos y el tipo de hidrocarburos en el océano, el estudio de ondas relacionadas al análisis de la familia **Daubechies** y el

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>31</b> de <b>107</b> |

aprendizaje automático (**algoritmo de vecino más cercano k**) aplicaron para optimización de los conjuntos de tipologías de derrames hidrocarburos en el océano. Las características rodearon RGB, expansión, complejidad, intensidad, desviación estándar, elipticidad, entropía, coeficiente de correlación. Las características se catalogaron manejando el algoritmo de vecino más cercano k. Los resultados obtenidos durante la investigación arrojaron la clasificación de derrames mediante transformaciones de ondas y algoritmos de aprendizaje automático tuvo un rendimiento adecuado con la configuraciones de parámetros similares, especialmente con 70% de datos de entrenamiento y 30% de datos de prueba utilizando una matriz de confusión, obteniendo una precisión del 99% para combustible empleando el análisis Daubechies 5, que revela mejores resultados para la tipología de los derrames de hidrocarburos en el océano, cuyos resultados indicaron que la detección de derrames de hidrocarburos mediante el uso de sensores remotos de radar de apertura sintética (SAR), proporciona una herramienta excelente en la caracterización de derrames de hidrocarburos. Se pueden extraer varias características del conjunto de datos de SAR.

En el año 2020, Chen, et al. [27], plantearon que, en las imágenes de satelitales de una zona de derrame de aceite detectada, Tiende a ser afectada por el ruido puntual y la intensidad desigual, lo que conduce a una segmentación deficiente de la zona de derrame de aceite. La investigación introdujo un método de segmentación semántica profunda que

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 32 de 107        |

combinaba una red neuronal convolucional profunda con el campo aleatorio condicional totalmente conectado para formar una conexión de extremo a extremo. El área de derrame de petróleo en la superficie del mar fue monitoreada por la imagen de teledetección multifuente y se estimó por imagen óptica. Se comparó experimentalmente el método propuesto con otros modelos en el conjunto de datos establecido por la imagen de satélite multisensorial. Los resultados mostraron que el método mejoró la precisión de la clasificación y capturó detalles finos del área de derrame de petróleo. La intersección media sobre la unión fue del 82,1%, y el efecto de monitoreo fue obviamente mejorado.

En el año 2020, Balogun, et al. [28], publicaron un artículo denominado “**Spatio-temporal analysis of oil spill impact and recovery pattern of coastal vegetation and wetland using multispectral satellite Landsat 8-OLI imagery and machine learning models**” con el cual concluían que los derrames de petróleo son siniestros a nivel global con consecuencias que impactan los aspectos socioeconómicos y dimensiones ambientales del ecosistema marítimo. Sin embargo, una evaluación integral de las afectaciones de los derrames de petróleo y la selección de enfoques de remediación apropiados se han restringido debido a la dependencia de experimentos de laboratorio que ofrecen una cobertura de área limitada y precisión de clasificación. En esta investigación implementaron el manejo de imágenes multiespectrales Landsat 8-OLI y aprendizaje automático para evaluar los impactos de los derrames de petróleo en la vegetación costera

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 33 de 107        |

y los humedales cuyo fin era monitorear la recuperación a nivel serial de vegetación contaminada y humedal costera.

El análisis de este estudio indica un estrés significativo en la vegetación y los humedales. Como se observó en el resultado de la vegetación, el 93% de los índices reflejaron una disminución en el valor, pero solo el 56% fueron estadísticamente significativos con un valor de  $p < 0.05$ . Para el humedal, el 87,5% de los índices mostraron un descenso en el valor de las áreas antes y después del derrame de petróleo y todos son estadísticamente significativos con un valor de  $p < 0,05$ . Concluyen que CVI, MDWI, NDVI, GCI, GNDVI, SARVI2 y SAVI son los índices de vegetación apropiados para la evaluación del impacto de la vegetación y los humedales, siendo los cuatro primeros los más convenientes debido a su mayor nivel de significancia para indicar el estrés de las plantas en comparación con otros índices. Además de estos siete índices de vegetación pueden encontrarse en la literatura: EVI, EVI 2, MNDVI, NDMI, NDWI y RDVI.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 34 de 107        |

| S/N. | Vegetation Indices                              |        | Formula                                         |
|------|-------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------|
| 1    | Aerosol free Vegetation Index                   | AFRI   | $\frac{(NIR - 0.66 * RED)}{(NIR + 0.66 * RED)}$ |
| 2    | Chlorophyll Vegetation Index                    | CVI    | $NIR \frac{RED}{GREEN^2}$                       |
| 3    | Enhanced Vegetation Index                       | EVI    |                                                 |
| 4    | Enhanced Vegetation Index 2                     | EVI2   | $2.4 \frac{NIR-RED}{NIR+RED+1}$                 |
| 5    | Green Chlorophyll Index                         | GCI    | $\left( \frac{NIR}{GREEN} \right) - 1$          |
| 6    | Green Normalized Difference Vegetation Index    | GNDVI  | $\frac{NIR-GREEN}{NIR+GREEN}$                   |
| 7    | Modified Difference Water Index                 | MDWI   | $\frac{GREEN-SWIR2}{GREEN+SWIR2}$               |
| 8    | Modified Normalized Difference Vegetation Index | MNDVI  | $\frac{NIR-SWIR2}{NIR+SWIR2}$                   |
| 9    | Moisture Stress Index                           | MSI    | $\frac{MIR}{NIR}$                               |
| 10   | Normalized Difference Moisture Index            | NDMI   | $\frac{(NIR-SWIR)}{(NIR+SWIR)}$                 |
| 11   | Normalized Difference Vegetation Index          | NDVI   | $\frac{NIR-RED}{NIR+RED}$                       |
| 12   | Normalized Difference Water Index               | NDWI   | $\frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}$                     |
| 13   | Renormalized Difference Vegetation Index        | RDVI   | $\frac{NIR-RED}{\sqrt{NIR+RED}}$                |
| 14   | RATION Vegetation Index                         | RVI    | $\frac{RED}{NIR}$                               |
| 15   | Soil and Atmospherically Resistant Vegetation   | SARVI2 | $GREEN * \frac{NIR-RED}{L+NIR+CI RED-C2 BLUE}$  |
| 16   | Soil Adjusted Vegetation Index                  | SAVI   | $\frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED+L)} * (1+L)$         |

**Figura 1. Análisis del estudio con indicaciones de estrés significativos en la vegetación y humedales**

En la figura anterior se establece los Índices de vegetación relacionados con la salud de la vegetación para el análisis de impacto y recuperación de vegetación y humedales contaminados y no contaminados. Los índices pueden ser utilizados para inspeccionar el impacto de derrames de hidrocarburos en humedales, ya que el verdor de la vegetación y la sensibilidad a la región de alta biomasa están más representados por el NIR, SWIR y

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 35 de 107        |

bandas ROJAS que son la base de los índices. Además, la comparación de las áreas no contaminadas y contaminadas durante un período similar confirmó el estado más saludable de la primera, aunque se observaron signos de recuperación en la segunda, lo que posiblemente se deba a las intervenciones de tratamiento por parte del gobierno. Sin embargo, se requieren más iniciativas para mejorar el proceso de recuperación. Por lo tanto, concluyeron que se puede inferir que la tecnología de teledetección y los modelos de aprendizaje automático son herramientas eficaces para la evaluación del impacto y la recuperación de la vegetación y los humedales afectados por el derrame de petróleo.

En la tercera conferencia internacional sobre informática y comunicación Innovadoras que tuvo lugar en Delhi (India) en 2020, Pushkar, et al.[29], plantearon que es posible la detección de buques a partir de imágenes satelitales a partir de una aplicación esencial para la seguridad marítima, el control del tráfico portuario, la gestión de desastres y las operaciones de rescate que incorporan vigilancia del tráfico, pesca ilícita, derrames de petróleo y observación de la contaminación oceánica, los autores sugirieron que se usarían imágenes satelitales de baja resolución utilizando la mejor combinación de redes adversarias generativas y redes neuronales convolucionales con respecto a la mejora de la imagen y la reducción de tiempo entrenamiento, así como, una alta precisión. La investigación no utilizó imágenes de alta resolución para poder tener resultados más precisos y acertados.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 36 de 107        |

En esta investigación se propone la creación de un algoritmo de detección de derrames de hidrocarburos basado en imágenes satelitales y algoritmos de redes neuronales convolucionales, el sistema será de acceso libre y estará alineado a los procesos misionales de la Dirección General Marítima de Colombia, permitiendo a los usuarios extraer regiones de interés, extraer patrones para procesos de clasificación y actualización del conjunto de datos disponibles a la fecha, además, el sistema favorecerá procesos de entrenamiento de nuevas aplicaciones en las zonas marítimas debido a que proporcionará las herramientas necesarias para entrenar modelos de redes neuronales profundas con imágenes satelitales como principal insumo en sus características. El sistema será un primer acercamiento a un software de información geográfica (SIG) debido al trabajo con librerías que facilitan el manejo de la georreferenciación de las imágenes [30]. Resumidamente, en este proyecto se presenta un proceso de detección de derrames de hidrocarburos utilizando la segmentación semántica con redes neuronales convolucionales profundas a través del estudio y análisis de imágenes satelitales de radar (Sentinel-1), además en este proyecto se genera información derivada del modelo de clasificación constituyendo productos de impacto que generan valor para la Dirección General Marítima de Colombia: detección de erosión y acreción costera, medidas de distancia entre el derrame de hidrocarburo y la zona costera.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 37 de 107        |

## 2.2. Marco contextual

Este proyecto investigativo consiste, en construir un sistema para la detección de derrames de hidrocarburos en mar abierto, utilizando imágenes satelitales de radar y algoritmos de redes neuronales convolucionales; se espera que el producto de esta investigación sea de utilidad para las instituciones cuya prioridad es salvaguardar los hábitats marítimos. Este proyecto nace por la falta de herramientas de uso libre y eficaces, enfocadas a la teledetección de siniestros marítimos, provocados por los derrames de petróleo y sus derivados en el océano; en este mismo orden de ideas del proyecto, se busca fomentar relaciones académico/científicas con el Centro de Investigación de Oceanografía Operacional perteneciente a la Dirección General Marítima de Colombia con el fin de combatir las problemáticas que afectan a poblaciones costeras.

Según diversas investigaciones recolectadas durante este proyecto y expuestas en el estado del arte, concluyen que la contaminación producida por los derrames de petróleo es excesivamente dañinas, que conllevan afectaciones directas a la biota marítima e igualmente a la economía de los territorios cercanos del siniestro, lo cual es un panorama muy alarmante, y más cuando afecta a la soberanía alimentaria de comunidades de bajos recursos económicos.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>38</b> de <b>107</b> |

### **2.3.Marco teórico**

Con respecto a los principales conceptos que se usarán en el desarrollo del presente proyecto, se tienen los siguientes:

#### **2.3.1. Percepción remota satelital**

La teledetección por satélite es una de las principales herramientas de soporte para la gestión de desastres [31], las imágenes satelitales han resultado de gran ayuda para muchos entornos como agricultura, minería, fenómenos naturales, detección de aguas contaminadas; de igual forma para el monitoreo de bosques y de glaciares, entre otras. A la herramienta que nos permite adquirir información de un objeto o fenómeno sin estar en contacto con él se le conoce como percepción remota. Este término se utiliza comúnmente para referirse a la observación de nuestro planeta a través de cámaras y otros tipos de sensores, como los radares y las cámaras térmicas, montados en aviones o satélites. [32]

#### **2.3.2. Sensores satelitales remotos**

Son sensores remotos que se puede clasificar en diferentes formas y tipos según la recopilación de la energía procedentes de las distintas cubiertas y métodos de recopilación. Los tipos de sensores pueden ser pasivos y activos, el primero clasifica se por la limitación de recibir la energía proveniente de un foco exterior al sensor y los activos se identifican

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 39 de 107        |

por ser capaces de emitir su propio haz de energía e igualmente por no ser dependiente de las condiciones exteriores al sistema.

### 2.3.3. Tipos de satélites



**Figura 2. Tipos de sensores satelitales**

Los satélites se clasifican en dos tipos en activos y pasivos, los cuales son utilizados para recopilar la información sobre de superficies terrestres específicas. En la figura 2 se observa el método de recolección de información de ambos tipos. En los satélites activos emiten señales microondas para la recopilación de la información, en cambio los satélites pasivos recopilan la energía electromagnética producida por las cubiertas terrestres.

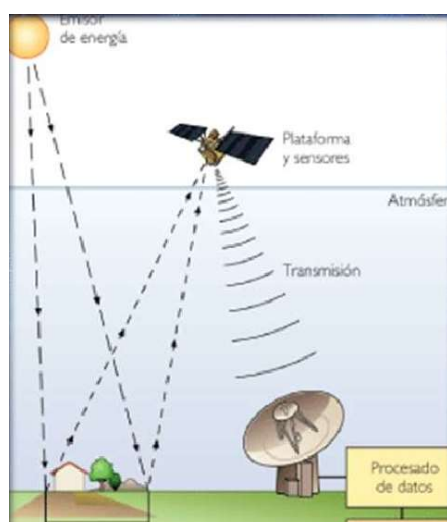
|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>40</b> de <b>107</b> |

### 2.3.3.1. Satélites activos

Los sensores satelitales activos son reconocidos por emitir señales (haz energético) que posteriormente es recopilado por los receptores para adquirir datos de la superficial del planeta que fue expuesto e igualmente cuenta con amplificadores de señal para así obtener mayor número de datos.

### 2.3.3.2. Satélites pasivos

Los sensores satélites pasivos recopilan la energía electromagnética producida por las cubiertas terrestres, procedentes de los rayos solares reflejados e igualmente de la temperatura. Los sensores satelitales, se puede clasificar según su funcionamiento y rendimiento en recopilación de información.



**Figura 3. Funcionamiento de satélites pasivos.**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>41</b> de <b>107</b> |

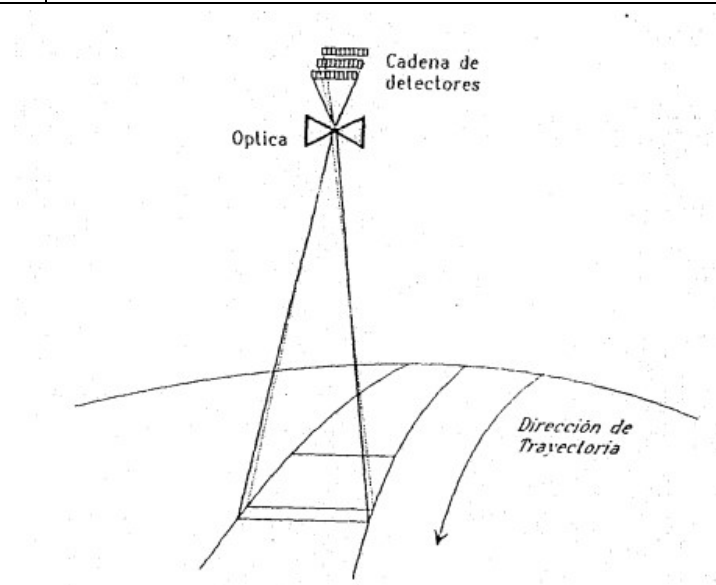
Para una visualización del funcionamiento de los satélites pasivos, se puede observar en la figura 3, el proceso recolección de la energía electromagnética emitida por el sol hacia la tierra e igualmente se observa la reflexión que se produce en las superficies terrestres que posteriormente es recogida por el satélite y transmitida para procesamiento de datos.

#### **2.3.3.2.1. Clasificación de satélites pasivos**

##### **2.3.3.2.1.1. Exploradores de barrido y empuje**

Este tipo de sensores combinan una óptica similar a la fotografía, pero con una detección electrónica que evita la dependencia de una superficie sólida al momento de recopilar la información. Las características de estos sensores se derivan por la señal expulsada por el equipo de óptico a estos detectores se muestra en intervalos regulares de tal modo que solo se recopila información de un único valor numérico cada distancia determinada, ese intervalo marca el tamaño de la unidad mínima de la información recogida por el sensor. Una ventaja de utilizar este tipo de sensor es que permite aumentar la banda del espectro identificada a longitudes de la onda, si generando mayor visión de las áreas.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 42 de 107        |



**Figura 4: Trayectoria de los exploradores de recorrido.**

En la figura 4 se observa la recopilación de información de los satélites exploradores de recorrido e igualmente se aprecia la dirección de la trayectoria del sensor óptico y su captura de imágenes.

#### **2.3.3.2.1.2. Radiómetros de microondas**

Este tipo de sensor está constituido por un elemento direccional, un receptor el cual permite la amplificación de las ondas (microondas) e igualmente en la recepción de la misma. También se puede decir que es un sensor de apertura circular y se recomienda que para obtener una adecuada resolución sería preciso contar una antena que proporcione

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>43</b> de <b>107</b> |

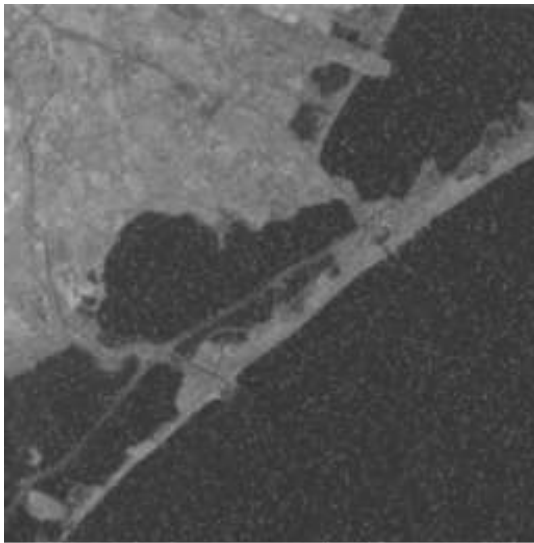
alta recepción y ampliación de la onda. Por otro lado, se puede mencionar su ventaja a nivel satelital es que es un sensor que no lo afecta la nubosidad del planeta.

Estos tipos de sensores se ven afectados en su rendimiento por la resolución espacial, nitidez, precisión geométrica y cobertura del terreno. También se debe denotar que las dos primeras favorecen a la fotografía aérea y las dos últimas a las cámaras espaciales.

#### **2.3.3.2.1.3. Satélites de radar de apertura**

Su principal característica es que emiten un haz energético que posteriormente con la reflexión es recopilada la información de la superficie hacia donde se dirigió las ondas, gracias a su reflexión puede trabajar en diversas condiciones atmosféricas e igualmente no es afectado por la nubosidad ni depende de alguna luz como la que es emitida por el sol. Otro dato que denotar es que trabaja en las bandas 0,1 cm y 1 m.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 44 de 107        |



(a)



(b)

**Figura 5. Visualización de imágenes SAR con filtro mediana o reducción de ruido.**

Para mejorar la visualización de las imágenes satelitales de radar de apertura es necesario aplicarle filtros, de tal modo que se reduzcan los factores que afectan a la calidad de observación de la imagen. En la figura 5 se observa dos imágenes satelitales de la misma región en la cual se puede apreciar una imagen SAR sin filtros y la segunda con filtro de la mediana (disminución del ruido).

#### **2.3.4. Satélites Ópticos y de Radar**

Los satélites artificiales poseen una función esencial para las tecnologías, realizando operaciones comprendidas en el envío y recepción de comunicaciones de uso

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>45</b> de <b>107</b> |

masivo, tales como, las conexiones de Internet, televisión, telefonía o para uso de recolección de información, incluso algunos satélites han sido enviados a órbita con fines militares y de investigación científica. Los satélites se pueden clasificar en radar y óptico. Los satélites de radar poseen una caracterización por la resolución de diferentes ángulos de visión en varias posiciones preestablecidas, por otro lado, los satélites ópticos son identificados por la comunicación denominada turbulencia atmosférica con sistemas ATP (adquisición, seguimiento y puntería) debido a que el efecto tubería atmosférica es generalmente pequeño en la propagación del enlace descendente cuando el rayo atraviesa una trayectoria no atmosférica hasta que alcanza unos 30 km de la superficie de la Tierra [33]

### **2.3.5. Tipos de resoluciones de los satélites ópticos y de SAR**

#### **2.3.5.1. Resolución espectral**

Indica la anchura y el número de las bandas espectrales que se pueden discriminar con el sensor, con el fin de identificar el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro. Por lo tanto, se puede decir que un sensor espectral ofrezca mayor número de bandas proporcionara más información espectral de las diferentes cubiertas.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 46 de 107        |

#### **2.3.5.2. Resolución radiométrica**

Es la capacidad de los sensores para identificar la intensidad de las fotografías o imágenes es decir la capacidad de los sensores en detectar las variaciones en la radiancia espectral que se obtiene en las imágenes o fotografías. En los casos de los sistemas fotográficos, la resolución radiométrica del sensor se indica por el número de niveles de gris recogido en el film. En el caso de óptico-electrónicos las imágenes se hace una conversión analógica-digital, el rango de codificación varía con la diferencia sensores y su sensibilidad.

#### **2.3.5.3. Resolución temporal**

Este concepto apunta a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, por lo tanto, se puede decir que hace referencia a la periodicidad con la que este obtiene imágenes de la superficie terrestre. La recopilación de esta información depende de la plataforma orbital (altura, velocidad e inclinación) e igualmente el diseño del sensor

#### **2.3.5.4. Resolución espacial**

Es la percepción del objeto más pequeño que se puede apreciar sobre una imagen, cuya separación se mide en unidades de longitud (mm sobre la fotografía o metros sobre el terreno) con dependencias de la longitud focal y de la altura sobre la superficie. Una

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 47 de 107        |

instancia esencial para la resolución espacial es el concepto de campo de visión instantáneo (IFOV) que define como la sección angular en medida de radianes. La resolución espacial basada en sensores de observación terrestre enfocada a la recopilación de información sobre áreas heterogéneas, con una resolución de 10\*10 m del sensor SPORT-HRV, hasta los 120\*120 m del canal térmico del Landsat-TM.



**Figura 6. Imagen óptica de satélite Landsat 5**

En la figura 6 se observa una imagen satelital de Venecia (Italia) del satélite Landsat 5, en la cual se observa parte continental y oceánica, con una resolución espacial de 30 metros y bandas 3, 2, 1.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>48</b> de <b>107</b> |

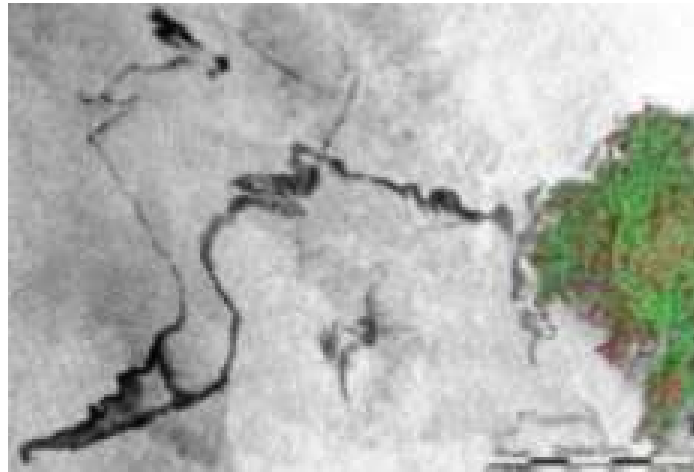
### **2.3.6. Biota acuática**

Se considera Biota acuática a las numerosas especies de flora y fauna que se encuentran en las fuentes oceánicas y mares, los cuerpos de agua cubren aproximadamente el 70 % de la superficie de la tierra, lo que los convierte en ecosistemas con un alto valor ambiental [34]

### **2.3.7. ¿Por qué es perjudicial un derrame de hidrocarburo?**

Los derrames de hidrocarburos en el entorno marino son una de las principales fuentes de contaminación del agua que causa graves daños ambientales y decadencia económica. Altera el marco ecológico de los océanos y mares a largo plazo causando grandes pérdidas y daños significativos a la biodiversidad acuática, a las finanzas locales, a la sociedad y a las comunidades costeras [35].

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>49</b> de <b>107</b> |



**Figura 7. Derrame de hidrocarburo en zona acuática.**

Como se observa en la figura 7, los derrames de petróleo pueden suceder cerca de las regiones costeras, lo cual afectaría negativamente a la fauna y flora e igualmente a la soberanía alimentaria de las zonas cercanas del siniestró marítimo.

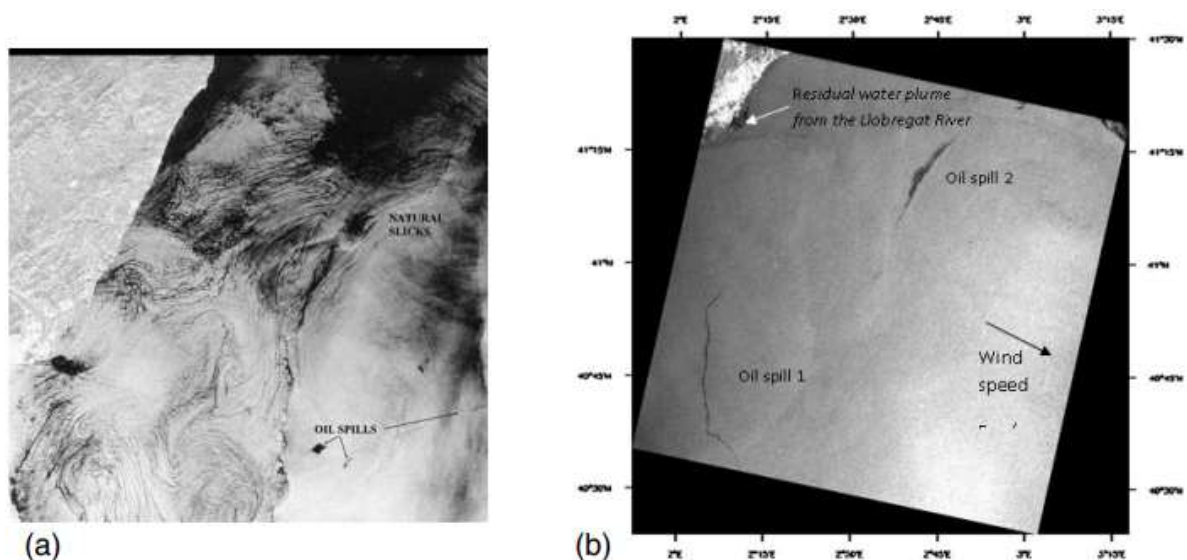
#### **2.3.8. SENTINEL-1**

Es un componente espacial de Copernicus, que se implementó a través de una constelación con dos satélites (unidades A y B), los cuales poseen instrumentos SAR de bandas C y con imágenes de 5.405 GHz. Cada unidad está proyectada para una vida útil de 7 años, con consumible aproximadamente para 12 años, con una órbita casi polar sincronizada con el sol (amanecer-anocheecer) a 697 km de altitud de la tierra. El Sentinel-1A se lanzó el 3 de abril de 2014, después de 18 meses se envió a órbita el sentinel-1B.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>50</b> de <b>107</b> |

Cada ciclo de repetición orbital comprende 12 días de cada satélite Sentinel-1, junto con pequeñas líneas de base orbitales permiten la aplicación de detección de cambios coherentes de interferometría SAR (InSAR), las cuales monitorean las deformaciones de la superficie (por ejemplo, subsidencia y tectónica) y la dinámica de la criósfera (por ejemplo, flujo glaciar) [36].

### 2.3.9. Imágenes de derrame de petróleo



**Figura 8. Imágenes satelitales de derrames de petróleo con mareas negras.**

En la figura 8 se aprecian dos imágenes SAR del satélite ERS-2. En la imagen a se evidencia la combinación de mareas negras y derrames de petróleo cerca de Barcelona con viento débil y en la imagen B visualiza dos derrames de petróleo cerca Barcelona.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 51 de 107        |

### **2.3.10. Aprendizaje profundo (Deep Learning)**

“El aprendizaje profundo permite modelos computacionales que están compuestos por múltiples capas de procesamiento para aprender representaciones de datos con múltiples niveles de abstracción” (LeCun, et al., 2015). Es decir, el aprendizaje profundo es un modelo matemático basado en redes neuronales que se caracteriza por tener múltiples capas ocultas (mayores a 4) y en cada capa logra un mejor nivel de abstracción, a través de la minimización de una función de coste utilizando el gradiente descendente.

### **2.3.11. Inteligencia artificial (Artificial Intelligence)**

La inteligencia artificial “Es la ciencia e ingeniería para construir máquinas inteligentes, especialmente, programas de computación inteligentes. Así como, lo relativo a la tarea de usar computadoras para entender la inteligencia humana, pero no limitada a métodos observables biológicamente.” (McCarthy, 2007 citado en Barrera Arrestegui, 2012), de este modo busca dotar de inteligencia a las máquinas para desarrollar tareas que de otra forma les resultaría imposible, debido a su complejidad; en el caso particular del presente proyecto se usa un algoritmo de aprendizaje profundo (Deep Learning), conocido como redes neuronales convolucionales que permiten al computador abstraer características de imágenes donde se encuentran residuos sólidos para una posterior clasificación.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 52 de 107        |

### **2.3.12. Redes neuronales convolucionales (Convolutional neural networks)**

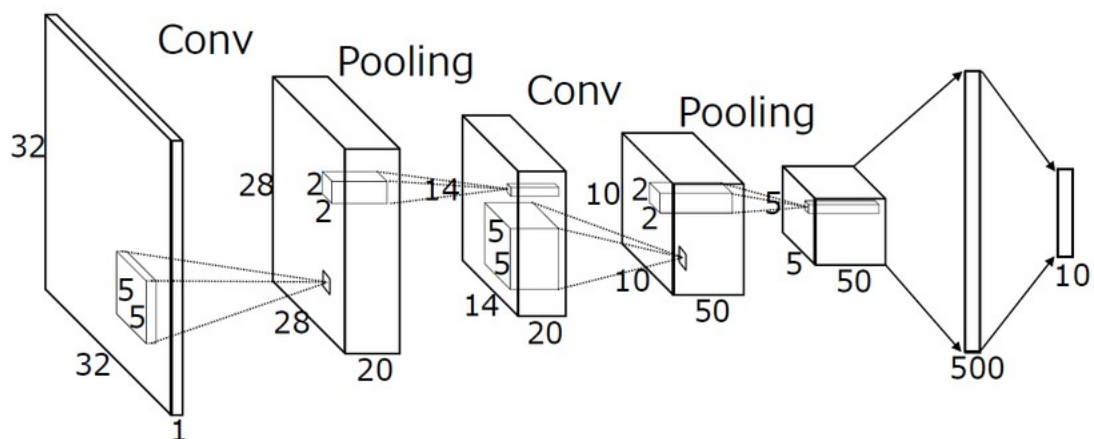
Este tipo de redes neuronales son usadas en proyectos basados en imágenes, creadas en el año 1990 por Yann LeCun et al. [37] se caracterizan por tener capas que realizan operaciones equivalentes a una convolución con un pequeño filtro; estas capas convolucionales se comportan como filtros que resumen la presencia de características en las imágenes de entrada. Gracias al uso de las capas convolucionales, se simplifica la construcción de clasificadores como el presentado en el presente proyecto, lo anterior porque al extraer las características de forma automática no se requiere de usar métodos complejos de procesamiento de imágenes para llevar a cabo la clasificación además de que reduce el coste computacional, facilitando su futura implementación.

### **2.3.13. Arquitectura LeNet**

La arquitectura LeNet está diseñado para el reconocimiento de caracteres escritos a mano e impresos a máquina mediante la utilización de visión por computadora, también se distingue por estar conformado de neuronas con pesos y sesgos que se pueden aprender de forma evolutiva. Cada neurona acepta varias entradas ya sean imágenes, audios o videos, posteriormente se toma una suma ponderada sobre ellas, la pasan a través de una función de activación y responde con una salida clasificada según la necesidad de la

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 53 de 107        |

investigación. LeNet es una red de cinco capas que consta de 2 capas convolucionales y 3 capas completamente conectadas.



**Figura 9. Diagrama de la arquitectura LeNet.**

En la figura anterior se puede visualizar la estructura que posee la CNN del modelo **LeNet**, la cual está comprendida mediante capas convolucionales y capas de agrupación, lo cual permite que sea una red neuronal de avance de retroalimentación cuyas neuronas artificiales pueden producir una respuesta a las células circundantes en el rango de cobertura y funcionamiento generando una adecuada clasificación en imágenes a gran escala.

#### **2.3.14. Sesgo en neuronas artificiales**

En el campo de los sistemas inteligentes (inteligencia artificial) como en las biológicas, cuando las neuronas procesan la información de han recibido y deciden si la

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>54</b> de <b>107</b> |

respuesta debe pasarse a la siguiente capa como información de entrada se le llama sesgo.

Este proceso de decisiones de enviar información a otras capas, está determinada por una función de activación integrada en el sistema. Por ejemplo, una neurona artificial solo puede pasar una señal de salida a la siguiente capa.

### **2.3.15. Visión por computadora (Computer Vision)**

“Consiste en describir el mundo que vemos en una o más imágenes y reconstruir sus propiedades tales como forma, iluminación y distribución de color” [2], la visión por computadora, además, de ser usada para identificar objetos de interés (Segmentación) es una ciencia que permite identificar diferentes características; además de ello llevar a cabo diferentes tipos de procesamiento de imagen, tales como rotación, ampliación, entre otros, que permiten incrementar el número de muestras con el fin de enriquecer el conjunto de datos que se dará a la red neuronal, a este proceso se le denomina Data Augmentation.

### **2.3.16. Algoritmo de clasificación de imágenes satelitales**

Los algoritmos de clasificación de imágenes de satelitales se pueden clasificar en dos categorías, supervisados y no supervisados, la aplicación de cada uno depende del conocimiento previo que tengan los investigadores expertos en la zona de estudio.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 55 de 107        |

Los algoritmos de clasificación de imágenes de satélite no supervisados trabajan sin el conocimiento previo de la zona de estudio. En este caso, el investigador experto sólo tiene que detallar el número total de clases deseadas, y el algoritmo no supervisado asocia los píxeles de la imagen en dicho número de clases, teniendo en cuenta únicamente los datos espectrales de las bandas. La tasa de acierto de la clasificación adquirida por estos métodos es menos fiable que los resultados ofrecidos por los algoritmos de clasificación supervisados, ya que en los algoritmos no supervisados se agrupa los píxeles de la imagen en clases sin tener en cuenta el conocimiento que tiene el investigador experto en la zona de estudio. Existen diversos algoritmos de clasificación no supervisados, como k-medias, isodata, maximin y el modelo neural.

Los **algoritmos** de clasificación de imágenes de satélite **supervisados** trabajan con el conocimiento previo de la zona de estudio, por lo que pueden hacer una clasificación más precisa y eficiente que los algoritmos de clasificación no supervisados, basándose en el conocimiento experto humano. En una fase anterior al proceso de clasificación, el investigador experto selecciona, de la propia imagen de satélite, diversas muestras de las diferentes clases. Esas muestras están conformadas por píxeles representativos que componen el denominado grupo de entrenamiento, sobre el que posteriormente se apoya el proceso de clasificación supervisado. Por lo tanto, en este proceso, el conocimiento del investigador experto sobre la zona de estudio establece la calidad, tanto del conjunto de

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>56</b> de <b>107</b> |

entrenamiento como de la tasa de acierto obtenida por parte del proceso de clasificación.

Los algoritmos de clasificación **supervisados** comparan cada píxel de la imagen con estas firmas elegidas por el investigador experto y, a continuación, cada píxel es etiquetado en la clase a la que más se asemeja espectralmente. Los algoritmos de clasificación supervisados ofrecen mejores resultados que los algoritmos de clasificación no supervisados. Existen diversos algoritmos de clasificación de imágenes de satélite supervisados, como paralelepípedos, mínima distancia, máxima verosimilitud, distancia de Mahalanobis y algoritmos difusos supervisados.

Los análisis proporcionados por los algoritmos de clasificación de imágenes de satélite tienen muchas aplicaciones medioambientales, militares, sociales y políticas. Estos resultados son los principales elementos que utilizan muchos sistemas geográficos (SIG) para ofrecer al usuario la información solicitado, como por ejemplo el cálculo del crecimiento del suelo en un intervalo de tiempo definido, la monitorización de la calidad ambiental después de desastres naturales, la creación de mapas GPS de manera automatizada, la actualización de la superficie cartográfica de una zona concreta, la prevención de desastres naturales, la evaluación de los riesgos de los recursos naturales o el estudio de la evolución del cambio climático en zonas del planeta. Por lo tanto, debido a que los algoritmos de clasificación de imágenes de satélite son la base de muchos SIG, es importante proporcionar unos resultados tan optimizados como sea posible. En la

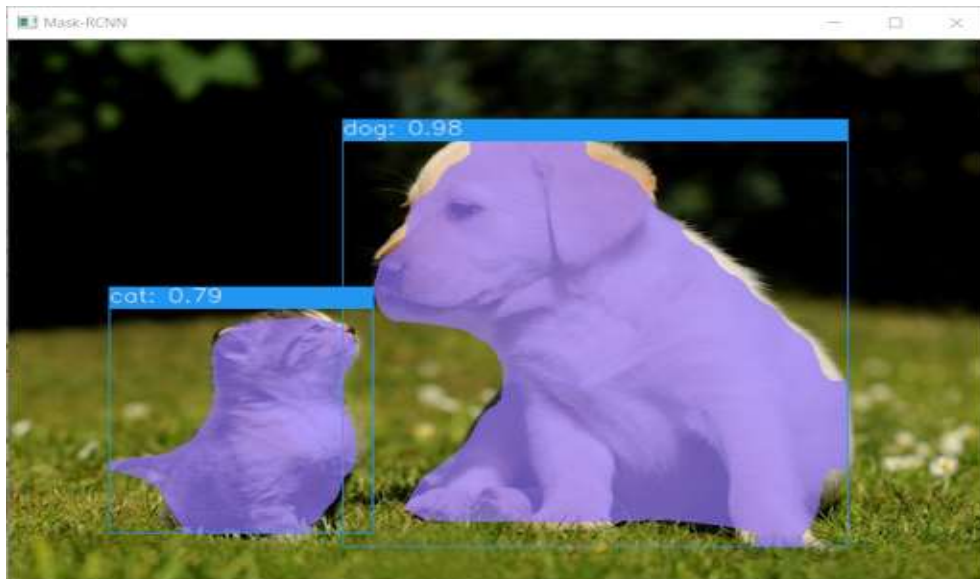
|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 57 de 107        |

actualidad existe una gran cantidad de algoritmos de clasificación, y el uso de cada uno depende del conocimiento que posea el investigador experto sobre la zona de estudio.[38]

### **2.3.17. Segmentación por instancia**

Es una tarea que distingue el contorno, la ubicación, la clase y el número de objetos en una imagen. Incorpora procedimiento de detección de objetos adicional para categorizar todas las instancias bajo consideración. La segmentación por instancias es un proceso mediante el cual busca identificar un objeto en una escena (imagen o video) y generar una máscara que permita extraer con precisión un objeto preestablecido, se puede que la segmentación por instancia consiste en dos procesos, el primero es detectar el área rectangular que contiene el objeto y posteriormente se obtiene la máscara que segmenta dicho objeto predefinido.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 58 de 107        |



**Figura 10. Imagen de etiqueta**

En la figura 10, se observa la identificación de dos objetos en una escena, en la cual se hace un etiquetado respectivo de las clases de objetos.



**Figura 11. Imagen con máscaras de objetos en blanco y negro**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>59</b> de <b>107</b> |

Se observa en la figura 11, las máscaras de los objetos a blanco y negro. Dando como clasificación la zona blanca, el área de los píxeles en que se encuentran los objetos detectados.

### **2.3.18. Segmentación semántica**

El objetivo de la segmentación semántica es la asignar de etiquetas a cada píxel de la imagen. El entendimiento del entorno y sus aplicaciones interponen limitaciones enfocadas a las capacidades de procesamiento disponibles y la complejidad de las escenas debido a esto se requieren un análisis específico que vaya más allá de los parámetros clásicos, es decir, se debe realizar un análisis para la asignación de la etiqueta o valor de cada uno de los píxeles de la imagen. La segmentación semántica tiene aplicaciones muy variadas, que van desde identificar contenido de escenas para la realización de tareas automatizadas hasta aplicaciones médicas que permiten analizar la información de diagnósticos u operaciones.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>60</b> de <b>107</b> |



**Figura 12. Imagen original**



**Figura 13. Imagen resultante de la máscara del proceso de segmentación semántica.**

En la figura 12, se puede observar una imagen, que está constituida por 5 clases de objetos (océano, barcos, continental, edificios y atmosfera), por otro lado, también se observa figura 13, en la cual se le ha realizado segmentación semántica para la clasificación de los objetos contenidos en la imagen anterior.

### **2.3.19. Métricas para la evaluación de la segmentación de imágenes**

La tarea de diseñar una medida apropiada de la efectividad de la segmentación de objetos es una tarea compleja. La métrica de evaluación debería brindar información relevante y debe tener en cuenta las siguientes condicionantes.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>61</b> de <b>107</b> |

#### **2.3.17.1. Precisión**

La precisión de una técnica de segmentación se dirige al grado en el que los resultados de la segmentación coinciden con la segmentación verdadera o ideal. Hay casos en las que la segmentación verdadera es conocida, y otras en las que la segmentación verdadera es desconocida. En dichos casos la segmentación verdadera se sustituye por una segmentación de forma manual realizada por un experto, analista o investigador, o realizada con otra técnica de imagen, o usando un algoritmo de segmentación del cual se conoce que produce resultados precisos. A la hora de evaluar el algoritmo de segmentación, es importante que se use un número suficiente de imágenes para la evaluación. La demostración del desempeño y la comparación usando un número reducido de imágenes es insuficiente para alcanzar conclusiones precisas.

#### **2.3.17.2. Estabilidad**

En la evaluación de la estabilidad de un algoritmo se ha de determinar la métrica apropiada para un grupo de imágenes usando tanto el algoritmo como estimaciones repetidas de la segmentación verdadera, es decir, diversas segmentaciones manuales de la misma imagen. De este modo, repetir las segmentaciones proporciona una estimación de la varianza de la misma. Usar estimaciones de la varianza tanto de la segmentación del

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 62 de 107        |

algoritmo, como de la segmentación verdadera, permite cotejar la variabilidad del algoritmo con la variabilidad en la determinación de la segmentación verdadera. Así mismo, puede compararse las variabilidades de diversos algoritmos con otro algoritmo o con el mismo algoritmo, pero con un conjunto distinto de parámetros. Se debe ser especialmente cuidadoso para asegurar que se emplea un número suficiente de pruebas de segmentación que permitan comparaciones significativas.

#### **2.3.17.3. Eficacia**

La eficiencia de la segmentación da un concepto del uso útil del algoritmo. Es habitual que se mida la eficiencia a través del tiempo de segmentación. Sin embargo, la eficiencia debería incorporar la cuantificación de todos los aspectos de la interacción con el usuario, así como evaluar que la técnica de segmentación sea apropiada o no para todas las imágenes. Además del tiempo de ejecución del algoritmo de segmentación, deben tenerse en cuenta los tiempos de inicialización, edición e inspección para ser documentados también, junto con la tasa de error o falla.

#### **2.3.17.4. Comparación de algoritmos**

Dado que un algoritmo de segmentación está sujeto a cambios diversos, como a la variación de los objetos que se segmentan y la interacción con el usuario, cualquier

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>63</b> de <b>107</b> |

comparación de las métricas para la evaluar la precisión discutidas anteriormente debe realizarse usando los estadísticos correctos. Las ventajas obtenidas con unos algoritmos respecto de otros, usando las métricas discutidas en esta sección, pueden no ser estadísticamente significativas por el hecho de que la ventaja es pequeña respecto de la variación de la segmentación por el número insuficiente de casos usados para la evaluación [39].

## **2.4.Marco legal**

En los siguientes puntos, se encuentran diferentes resoluciones que soportan y rigen la realización del proyecto. Los derrames de hidrocarburos en Colombia y su atención están soportadas por las leyes:

### **2.4.1. Convenio para la protección y el desarrollo del medio marino en la región del gran caribe (ley 56 de diciembre 23 de 1987)**

Establece la “Disposiciones Generales por Partes Contratantes procurarán concertar acuerdos bilaterales o multilaterales, incluidos acuerdos regionales o subregionales, para la protección del medio marino (con el fin de prevenir, reducir y controlar la contaminación)” [40].

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 64 de 107        |

#### **2.4.2. Protocolo relativo a la cooperación para combatir los derrames de**

##### **hidrocarburos en la región del gran caribe (ley 56 de diciembre 23 de 1987)**

Apoya y establece “los medios para hacer frente a los incidentes de derrame de hidrocarburos y se esforzarán por reducir el riesgo de ellos. Esos medios comprenderán la promulgación, cuando fuere necesario, de la legislación pertinente, la preparación de planes de emergencia, la determinación y el desarrollo de medios que permitan hacer frente a incidentes de derrame de hidrocarburos y la designación de una autoridad responsable de la aplicación del presente Protocolo” [40].

#### **2.4.3. Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos, 1990 (oprc 90) (ley 885 de 2004)**

Determina “políticas sobre planes de emergencia, notificación, sistemas de lucha contra la contaminación, cooperación, manejo a nivel bilateral y multilateral de eventos por derrame de hidrocarburos” [40].

#### **2.3.4. Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos, 1990 (oprc 90) (ley 885 de 2004)**

Impone “planes de Emergencia: Los buques que tengan derecho a enarbolar su pabellón lleven a bordo un plan de emergencia en caso de contaminación por

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>65</b> de <b>107</b> |

hidrocarburos; Las empresas explotadoras de las unidades mar adentro sometidas a su jurisdicción.; Autoridades y empresas a cargo de puertos marítimos e instalaciones de manipulación de hidrocarburos sometidos a su jurisdicción” [40]

### **2.3.5. Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos, 1990 (oprc 90) (ley 885 de 2004)**

Prestablece que las “personas que estén a cargo de puertos marítimos e instalaciones de manipulación de hidrocarburos sometidos a su jurisdicción, notificarán a la autoridad nacional competente todo evento que haya producido o sea probable que produzca una descarga de hidrocarburos o dé lugar a la presencia de hidrocarburos” [40].

### **2.4.6. Acuerdo sobre la cooperación regional para el combate contra la contaminación del pacífico sudeste por hidrocarburos y otras sustancias nocivas en casos de emergencia (ley 45 del 26 de febrero de 1985)**

Artículo 4: Las Partes Contratantes se esforzarán por promover y establecer planes y programas de contingencia para combatir la contaminación marina por hidrocarburos y otras sustancias nocivas y por mantener e incrementar los medios necesarios para estas finalidades, mediante la cooperación bilateral o multilateral y la acción individual de cada

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 66 de 107        |

Estado. Dichos medios incluirán, en particular, equipos, barcos, aviones y la mano de obra experimentada para las operaciones en casos de emergencia. [40]

#### **2.4.7. Convenio internacional para prevenir la contaminación ocasionada por los buques marpol 73/78 (ley 12 de 1981)**

Incorpora “un plan con arreglos a las directrices<sup>1</sup> elaboradas por la Organización y estará redactado en idioma del capitán y sus oficiales. Este plan debe contener por lo menos:

- Procedimiento del Capitán u otras personas al mando del buque para notificar un suceso de contaminación por hidrocarburos.
- Lista de autoridades o personas a quienes debe darse aviso.
- Descripción detallada de las medidas que deben adoptar las personas a bordo.
- Procedimientos y el punto de contacto a bordo del buque para coordinar las medidas correspondientes con las autoridades nacionales y locales” [40].

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 67 de 107        |

### **Capítulo 3: Clasificación de imágenes de radar de apertura sintética**

#### **3.1. Metodología**

El proyecto se desarrolló con una metodología del patrón de investigación iterativo, ya que se utilizó los conceptos de aprendizaje profundo y percepción remota satelital para el desarrollo del sistema de detección de derrames de hidrocarburo en zonas de mar abierto, mediante la utilización de redes neuronales convolucionales e imágenes satelitales de radar del Sentinel-1. La priorización sobre la zona de la cuenca pacífica se produce debido a la necesidad de salvaguardar y preservar el ecosistema marítimo del territorio colombiano ante posibles accidentes relacionadas con los derrames de hidrocarburos en áreas oceánicas e igualmente se tuvo en cuenta la fomentación de relaciones entre identidades gubernamentales y educativas (DIMAR y Corporación Universitaria Comfacaucá - Unicomfacaucá), se hace teniendo en cuenta que en la dirección general marítima de Colombia, específicamente en el centro de investigaciones oceanográficos e hidrográficos del pacífico, se estudian fenómenos relacionados sobre la cuenca Pacífica Colombiana, en este caso vinculados con derrames de hidrocarburos. Por lo que el requerimiento de esta entidad para hacer parte del proyecto, es que la detección de derrames de hidrocarburos estuviese centrada sobre esta región, por lo tanto se utilizan las imágenes satelitales de radar y se selecciona zonas de búsqueda que complementan la cuenca pacífica Colombiana, utilizando el sistema de datos de la agencia espacial

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>68</b> de <b>107</b> |

Europea, se proporcionan las coordenadas de longitud y latitud relacionadas y se busca a partir del año 2015 hasta 2021 los eventos ocurridos de derrames en esta zona, utilizando las noticias recopiladas en una previa revisión, el conjunto de datos se complementa con otras regiones donde hubo derrames de hidrocarburos con el objetivo de enriquecer el dataset que se había formulado inicialmente.

### **3.2. Etapas**

Durante el desarrollo del proyecto, la metodología se dividió en cuatro etapas para el cumplimiento de las tareas planteadas, además, se implementa una etapa de actualización continua del estado del arte e igualmente en la organización de la documentación requerida para el trabajo de investigación.

#### **3.2.1. Etapa 1: Identificación**

En la etapa 1 se realizó la construcción del conjunto de datos, mediante la recolección de información relacionada con muestras de derrames de hidrocarburos en el océano. Para completar este proceso se establecieron subetapas en las cuales se definieron tareas específicas para un mejor rendimiento.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>69</b> de <b>107</b> |

### **3.2.1.1.Observación**

Se realiza la búsqueda de la información correspondiente a los distintos reportes de derrames de hidrocarburos en el océano basándose en noticias o registros ambientales encontrados en internet, televisión, revistas, periódicos y otros medios de comunicación. En este método de búsqueda se establecieron unas pautas para la recolección de datos, de tal modo que se pudiera establecer datos específicos como la ubicación exacta, periodo del derrame, tipo de hidrocarburo y fecha del desastre.

### **3.2.1.2.Identificación**

Se identificaron los siniestros marítimos recolectados sobre los derrames de hidrocarburos en zonas de mar abierto que poseían disponibilidad de información satelital del Sentinel-1, por lo que se define una ventana de tiempo correspondiente desde el año 2015 hasta la fecha. También se tuvo en cuenta la recopilación de imágenes satelitales de la cuenca pacífica colombiana, con el fin de proporcionar información satelital sobre esta área e igualmente se suministró esta información satelital al módulo del entrenamiento del sistema de detección de derrames de hidrocarburo desarrollado durante el proyecto.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 70 de 107        |

| ID | Zona en el mundo                            | Fecha derrame            | Tipo de hidrocarburo | Cantidad derramada     | Link de la información                                                                                            |
|----|---------------------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 41 | Galia                                       | 26 de septiembre de 2015 | Petroleo             | 100 mil toneladas      | <a href="https://www.20minutos.es/noticia/728547/0/ver/">https://www.20minutos.es/noticia/728547/0/ver/</a>       |
| 42 | Francia                                     | 7 de julio de 2016       | Petroleo             | 250 mil toneladas      | <a href="https://www.20minutos.es/noticia/728547/0/ver/">https://www.20minutos.es/noticia/728547/0/ver/</a>       |
| 43 | Estrecho de Malaca                          | 27 de julio de 2019      | Petroleo             | 237 mil toneladas      | <a href="https://www.20minutos.es/noticia/728547/0/ver/">https://www.20minutos.es/noticia/728547/0/ver/</a>       |
| 44 | Sudafrica                                   | 28 de julio 2019         | Petroleo             | 100 mil toneladas      | <a href="https://www.20minutos.es/noticia/728547/0/ver/">https://www.20minutos.es/noticia/728547/0/ver/</a>       |
| 45 | Francia                                     | 2 de septiembre de 2019  | Petroleo             | 123 mil toneladas      | <a href="https://www.20minutos.es/noticia/728547/0/ver/">https://www.20minutos.es/noticia/728547/0/ver/</a>       |
| 46 | estados unidos(Port Arthur)                 | 10 de septiembre de 2019 | crudo                | 1700 toneladas         | <a href="https://expansion.mx/mundo/2010/05/02/los-de">https://expansion.mx/mundo/2010/05/02/los-de</a>           |
| 47 | idos(San Francisco con la ciudad de Oakland | 29 de octubre de 2019    | crudo                | 132 toneladas          | <a href="https://expansion.mx/mundo/2010/05/02/los-de">https://expansion.mx/mundo/2010/05/02/los-de</a>           |
| 48 | estados unidos(bahía de Tampa)              | 2 de marzo de 2020       | hidrocarburos        | 64 toneladas           | <a href="https://expansion.mx/mundo/2010/05/02/los-de">https://expansion.mx/mundo/2010/05/02/los-de</a>           |
| 49 | estados unidos(Cibro Savannah)              | 7 de abril de 2020       | hidrocarburos        | 32 toneladas           | <a href="https://expansion.mx/mundo/2010/05/02/los-de">https://expansion.mx/mundo/2010/05/02/los-de</a>           |
| 50 | Bahia de quintero                           | 15 de mayo 2020          | Crudo                | 3 mil litros           | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=mDHNRNQ">https://www.youtube.com/watch?v=mDHNRNQ</a>                     |
| 51 | estados unidos(Mar de Timor)                | 5 de junio de 2020       | Crudo                | 450 toneladas          | <a href="https://expansion.mx/mundo/2010/05/02/los-de">https://expansion.mx/mundo/2010/05/02/los-de</a>           |
| 52 | Deepwater Horizon                           | 5 de junio de 2020       | Crudo                | 900 millones de litros | <a href="http://www.oceanfutures.org/news/blog/Derram">http://www.oceanfutures.org/news/blog/Derram</a>           |
| 53 | Brasil(nordeste de brasil)                  | 9 de junio de 2020       | petroleo             | 500 toneladas          | <a href="https://www1.folha.uol.com.br/internacional/es/i">https://www1.folha.uol.com.br/internacional/es/i</a>   |
| 54 | Chile(isla guarelo)                         | 23 de junio de 2020      | petroleo             | 40 mil litros          | <a href="https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/regi">https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/regi</a> |
| 55 | japon (Mar de japon)                        | 22 de julio de 2020      | petroleo             | 19000 toneladas        | <a href="http://www.endgame.org/oilspills.htm">http://www.endgame.org/oilspills.htm</a>                           |
| 56 | brasil(Bahía de Guanabara, Río de Janeiro)  | 6 de agosto de 2020      | petroleo             | 1100 toneladas         | <a href="http://www.endgame.org/oilspills.htm">http://www.endgame.org/oilspills.htm</a>                           |
| 57 | Golfo Triste, Bandera del estado Yaracuy C  | 10 enero del 2018        | petroleo             | 1000 toneladas         | <a href="http://efectococuyo.com/la-humanidad/derrame">http://efectococuyo.com/la-humanidad/derrame</a>           |
| 58 | venezuela(anzoategui)                       | 25 de julio del 2020     | petroleo             | Desconocido            | <a href="https://www.business-humanrights.org/es/%C3">https://www.business-humanrights.org/es/%C3</a>             |

**Figura 14. Muestreo de colección de datos recopilados.**

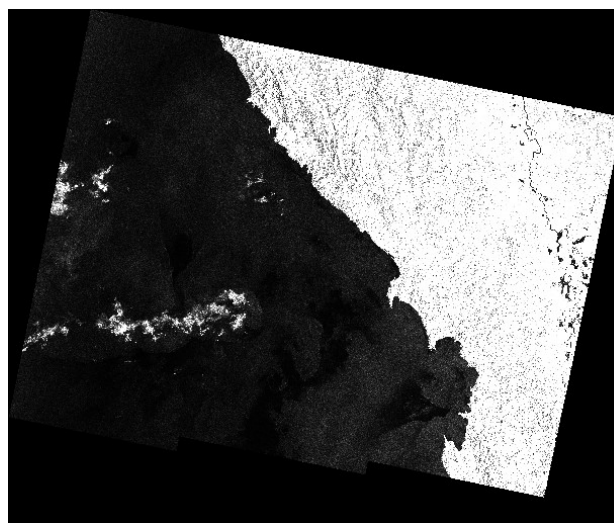
Durante este proceso se identificaron 82 informes de derrames de hidrocarburo en el océano, estos datos fueron debidamente autenticados para su recopilación. En la figura 14, se puede observar una muestra de los datos recogidos durante esta etapa.

### 3.2.1.3. Desarrollo

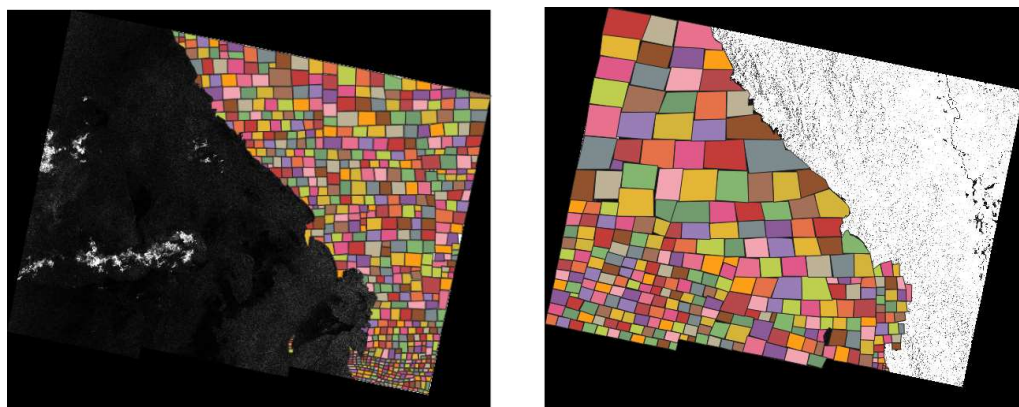
Después de una revisión y clasificación de la información, se procedió a la descarga de las imágenes satelitales SAR enfocadas en los derrames de hidrocarburos que se encuentran en un lapso de tiempo observable por parte del satélite Sentinel-1. Posteriormente, se realizó un etiquetado de las regiones de interés categorizando las áreas comprendidas en la imagen satelital. La categorización de estas áreas consiste en recortar las zonas oceánicas, continentales y derrames de hidrocarburos a través de la técnica de la fotointerpretación, finalmente, todas imágenes se agruparon en carpetas según la clase

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 71 de 107        |

identificada, este nuevo conjunto de datos fue utilizado para el entrenamiento del modelo de clasificación.

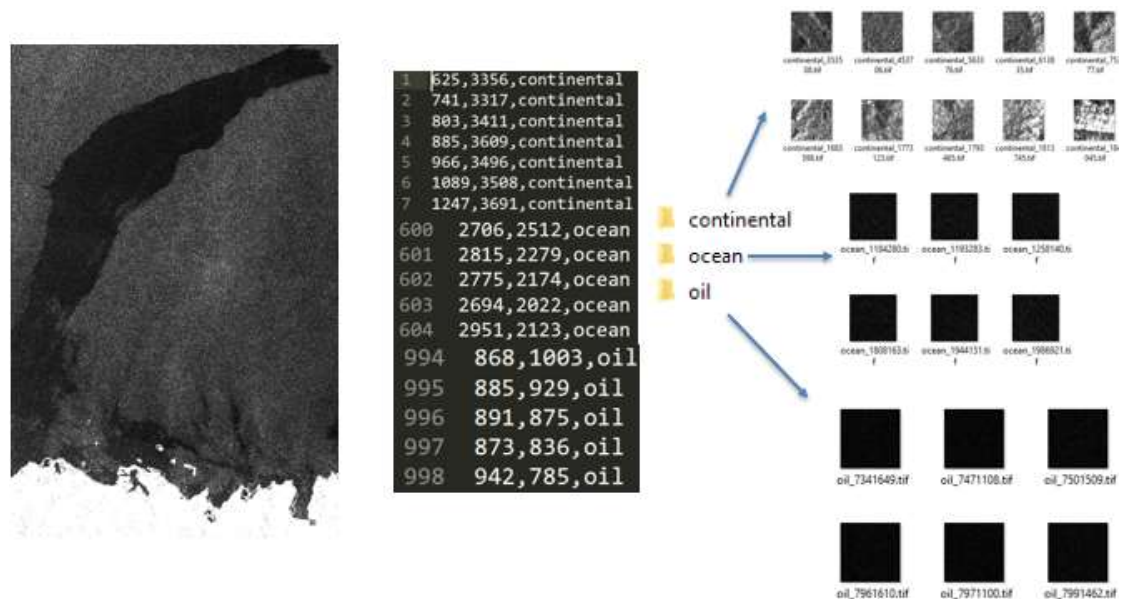


**Figura 15. Imagen satelital del Sentinel-1 preprocesada.**



**Figura 16. Recortes de áreas de interés, clases: continental, oceánica y derrames.**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 72 de 107        |



**Figura 17. Categorización de zonas según el tipo de clases.**

En la figura 15, se puede apreciar una imagen satelital del Sentinel-1 y su contenido espectral relacionado con el speckle, además, debido a la naturaleza de la onda que emite el satélite se logra una inmunidad a la nubosidad. En la figura 16, se observa los recortes realizados teniendo como base las clases estimadas en el proyecto (océano, derrame y continental). En la figura 17, se realiza el proceso de creación de las respectivas carpetas que se utilizaron para el entrenamiento del modelo y se registra en un archivo de texto plano el pixel central que fue tenido en cuenta para la extracción de la imagen característica.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 73 de 107        |

#### **3.2.1.4. Pruebas**

Para esta etapa de pruebas se generó diferentes archivos vectoriales que indicaban la presencia de derrames de hidrocarburos en el océano mediante el software de información geográfica QGIS. Los archivos vectoriales fueron cargados a través de este software y se verificó que su metadata tuviese la georreferenciación correcta de la zona y la profundidad de bits relacionada con el contenido espectral de la imagen: pixel tipo flotante o 32F.

#### **3.2.1. Etapa 2: Desarrollo del sistema.**

Una vez contruidos los datos para entrenamiento y su debido procesamiento de imágenes, se procedió a la construcción del sistema capaz de detectar de derrames de hidrocarburos basado en imágenes satelitales del Sentinel-1 y redes neuronales convolucionales.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 74 de 107        |

```

import numpy as np
import cv2 as cv
from Visualization.visual import visual
from HandlingSI.handlingSI import handlingSI
from ExtractionPoints.extraction import extraction
from BuildDataset.buildDataset import buildDataset
from Classification.Training import training
from Classification.Inference import inference

path_to_SAR_VV = r"source\Venezuela_SAR.tif"

handSI = handlingSI(path_to_SAR_VV)

obvisual = visual()
SARimage_visual = obvisual.contrast(handSI.SARimage,minvalue=None,maxvalue=0.2,method=4)
ACM = obvisual.ColorMapMethod(id_colormap=1)
extractor = extraction(SARimage_visual,"continental","dataset_pointers_venezuela2.txt")
extractor.run(savePoints=False)
extractor.set_nameclass("ocean")
extractor.run(savePoints=False)
extractor.set_nameclass("oil")
extractor.run()

#buildDS = buildDataset("dataset_v1", handSI.SARimage, handSI.raster, kernel = 7, points = extractor.pointers)
#handSI.saveSI(SARimage_visual,"Kuwait_contrast_improved.tif")
#handSI.saveImage(ACM,"Kuwait_contrast_improved.png")
'''cv.namedWindow('raster SAR',cv.WINDOW_NORMAL)
cv.imshow('raster SAR',SARimage_visual)
cv.namedWindow('raster SAR ACM',cv.WINDOW_NORMAL)
cv.imshow('raster SAR ACM',ACM)
cv.waitKey(0)'''

```

**Figura 18. Fragmento de código del sistema de detección de derrames de hidrocarburos en el océano mediante la utilización de imágenes SAR**

### 3.2.1.1.Observación

Se definió la arquitectura de redes neuronales convolucionales, que permitiera la correcta clasificación de derrames de hidrocarburos en el océano mediante la utilización de imágenes SAR (Radar de apertura sintética) con bajo consumo de recursos computacionales con el fin de ser ejecutado el entrenamiento en un computador con procesador i7 de 2.4GHz y memoria RAM de 8GB.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 75 de 107        |

### 3.2.2.2. Identificación

Una tarea principal para el desarrollo del proyecto fue la identificación de la arquitectura y el algoritmo de entrenamiento que mejor se acoplara al desarrollo del sistema de detección de derrames de hidrocarburos e igualmente fuera de bajo consumo computacional, por lo tanto, se establecieron los siguientes parámetros y requerimientos para el desarrollo del sistema: como lenguaje programación se definió Python y Tensorflow como biblioteca para la construcción de redes neuronales profundas. Un framework para trabajar con imágenes satelitales llamado GDAL y el servidor de la Agencia Espacial Europea (Copernicus) para la descarga de las imágenes Sentinel-1.

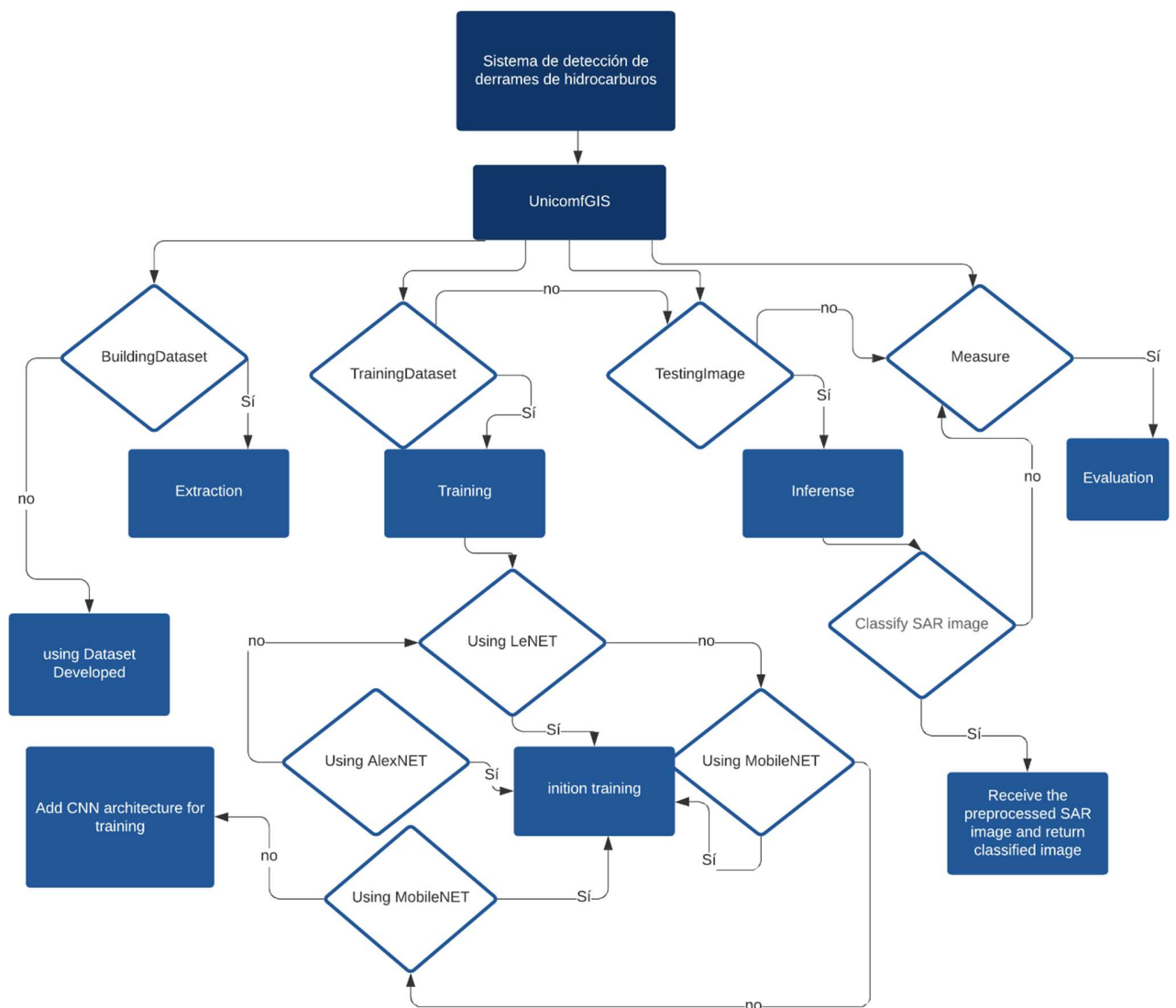
### 3.2.2.3. Desarrollo

Durante el desarrollo del sistema, se define una arquitectura para la construcción del sistema de detección de derrames de hidrocarburo. Los módulos fueron pensados en el principal objetivo relacionado con entrenamiento, validación y pruebas de una red neuronal convolucional (CNN) para resolver una tarea de clasificación. La arquitectura final del software **OilSpill Dectection** se muestra en la figura 20 y en la figura 18, se observa un fragmento de código. Se implementan módulos para el manejo de imágenes satelitales georreferenciadas de 32F en su contenido espectral en los módulos: **Visual**, que está encargado de aplicar los filtros correspondientes para las imágenes satelitales,

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 76 de 107        |

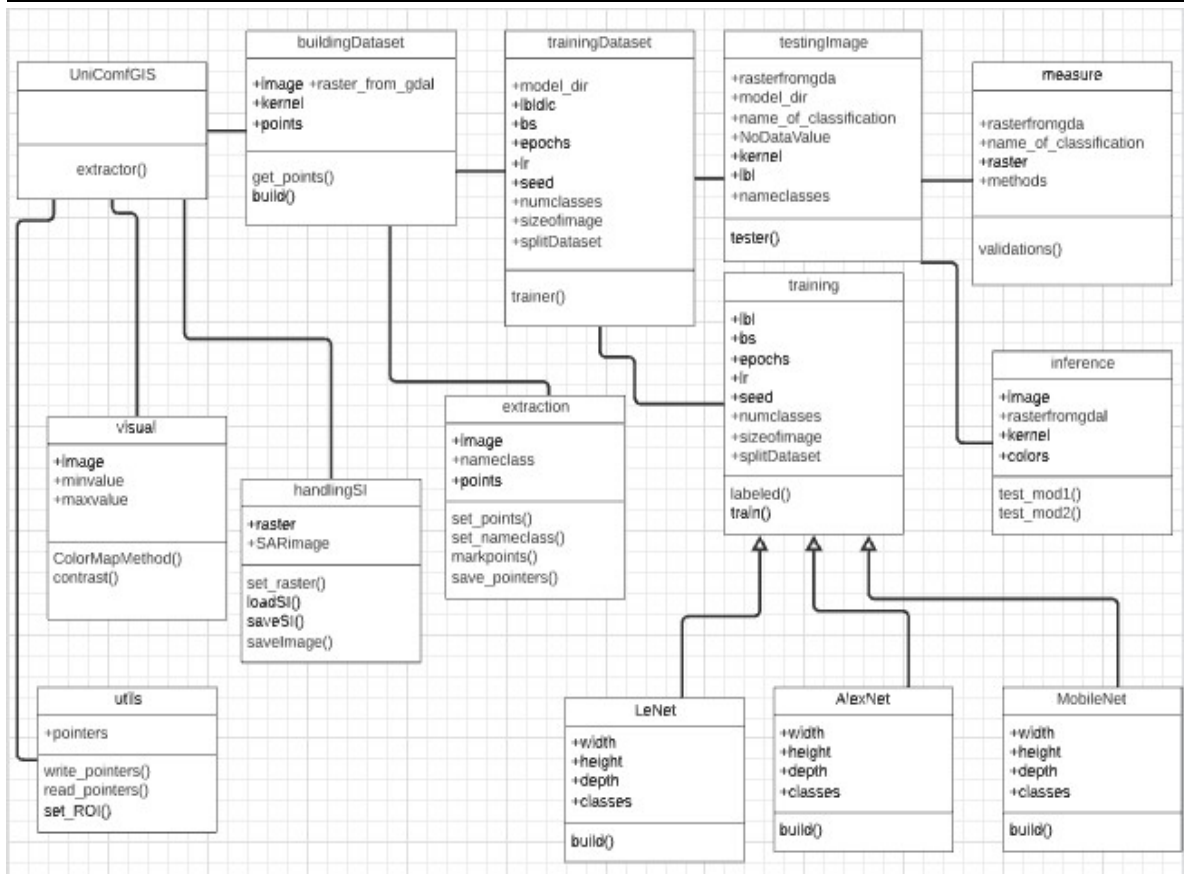
**handlingSI**, se encarga de manejar, escribir y leer los puntos de interés y **utils**, encargado de cargar y guardar las imágenes raster de los puntos de interés. El módulo **buildingDataset** se enfoca en la construcción del conjunto de datos que se usará para la correcta clasificación de las clases en las imágenes satelitales y el módulo **extraction** se encarga de la extracción de características de cada clase (land, ocean, oil). La etapa de entrenamiento de una red neuronal convolucional profunda es realizada por el módulo **trainingDataset** y la construcción de diversas arquitecturas de redes neuronales se realiza a través del módulo **Training** en cuyo caso hereda a través de distintas clases las arquitecturas CNN establecidas en el estado del arte de tratamiento de imágenes. A través de los módulos **testingImage** e **Inference** se realiza la etapa final de validación y prueba de los modelos entrenados. Finalmente, una clase relacionada con la construcción de métricas de validación para procesos de clasificación de imágenes puede ser vista en la figura 20 con el nombre **measure**. De esta manera la imagen previamente a ser clasificada pasa por los módulos donde se determina si ha habido derrame de hidrocarburo en zona de mar abierto.

|                                                                                   |                                                                                             |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p align="center"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p align="center"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                             | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                             | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                             | Página 77 de 107        |



**Figura 19. Diagrama de flujo del sistema desarrollado para la detección de derrames de hidrocarburos en el océano.**

|                                                                                   |                                                                                                                       |  |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> |  | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       |  | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       |  | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       |  | Página 78 de 107        |



**Figura 20. Diagrama de clases del sistema desarrollado para la detección de derrames de hidrocarburos en el océano.**

#### 3.2.2.4. Pruebas

Durante el desarrollo de las pruebas del sistema de detección de hidrocarburos en zonas de interés, se utilizaron sistemas de inferencia, que evaluaron el modelo de red neuronal convolucional entrenado en el paso anterior.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 79 de 107        |

### **3.2.2. Etapa 3: Evaluación**

Durante la etapa de evaluación del sistema de detección de derrames de hidrocarburos se utilizaron métricas relacionadas con los procesos de clasificación de las imágenes. Una métrica de evaluación empleada durante este proceso fue el coeficiente Kappa e igualmente se midió la pérdida y la precisión del modelo de aprendizaje de una red neuronal.

#### **3.2.3.1. Observación**

Durante la observación se determinaron derrames de hidrocarburos ocurridos en zonas marítimas y que se ajustaban a la base de datos de noticias encontradas en diferentes sitios web, esta validación fue realizada teniendo en cuenta la ventana de tiempo establecida por el satélite Sentinel-1.

#### **3.2.3.2. Identificación**

Se identificaron derrames de hidrocarburos en las zonas de interés del proyecto generando estadísticas relacionadas con amplitud del derrame, área del derrame y distancia a la línea de costa.

#### **3.2.3.3. Desarrollo**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>80</b> de <b>107</b> |

Se desarrolló módulos pertenecientes a la generación de información evaluativa, basada en las detecciones de los derrames de hidrocarburos con énfasis en obtener la precisión del entrenamiento de la red neuronal teniendo en cuenta el coeficiente Kappa y medidas de error: función pérdida entropía cruzada.

#### **3.2.3.4. Pruebas**

Se ejecutó el sistema de detección de derrames de hidrocarburos con imágenes satelitales SAR. Los resultados de las reconstrucciones de las diferentes detecciones fueron comprobados utilizando la técnica de la fotointerpretación.

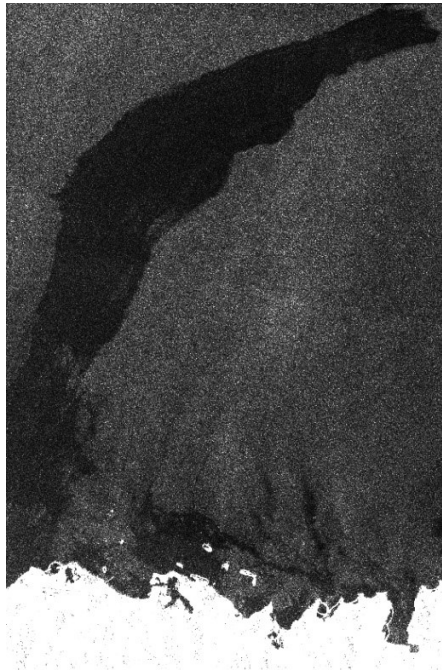
|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>81</b> de <b>107</b> |

## **Capítulo 4: Resultados y análisis**

### **4.1. Detección de derrames de hidrocarburos a través de imágenes satelitales**

Como se mencionó en el capítulo 3, se realizaron procesos de clasificación abarcando áreas de interés sobre imágenes satelitales Sentinel-1, este proceso se llevó a cabo mediante la recopilación de información de noticias sobre derrames de hidrocarburos en zonas oceánicas, posteriormente se realizó la descarga de las imágenes satelitales en el lazo de tiempo que comprende la resolución temporal del sentinel-1 (posterior al 2015), luego se realizó un preprocesamiento a estas imágenes satelitales para subsiguientemente detectar información principal para el desarrollo del proyecto teniendo en cuenta que se le realizó una reducción de ruido speckle y entre otros pre-procesos para la implementación de estas imágenes en el dataset propuesto en el objetivo específico 1. Durante este proceso se pudo establecer áreas continentales, oceánicas y derrames de hidrocarburos, mediante la técnica de fotointerpretación sobre las imágenes preprocesadas SAR, las cuales fueron geolocalizadas geométricamente igualmente se puede mencionar que durante este proceso de construcción de dataset se recopilaban áreas comprendidas sobre la cuenca pacífica colombiana, de tal modo de enriquecer este conjunto de datos.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>82</b> de <b>107</b> |



**Figura 21. Imagen satelital de derrame de hidrocarburo cercano a la costa.**

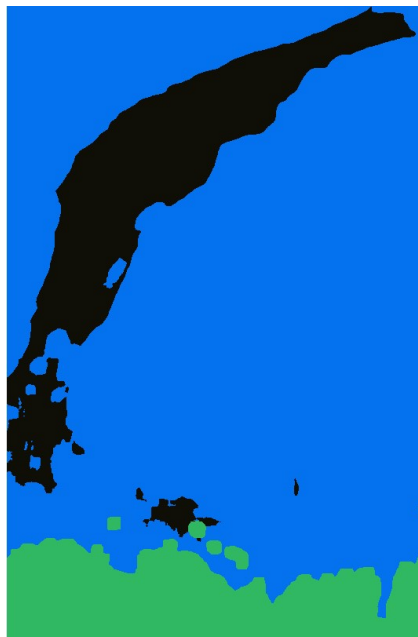
**Tabla 1. Caracterización de las clases definidas (Detección de derrames de hidrocarburos)**

| Cobertura               | Clase | Color asignado                                                                        |
|-------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Continental             | 0     |  |
| Océano                  | 1     |  |
| Derrame de hidrocarburo | 2     |  |

El proceso de entrenamiento utilizando el conjunto de datos construido a partir de escenas del satélite Sentinel-1 (ver Figura 21) fue llevado a cabo con diferentes arquitecturas de redes neuronal convolucionales profundas, para este proceso de clasificación se manejaron tres etiquetas expresadas en la Tabla 1. Una etapa de

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>83</b> de <b>107</b> |

preprocesamiento fue realizada sobre la data cruda de las escenas Sentinel-1, dicho proceso permitió que las imágenes de entrenamiento tuviesen una resolución espacial por pixel de 10m x 10m. El resultado del proceso de clasificación es mostrado en la figura 22, utilizando la codificación por colores descrita en la Tabla 1.

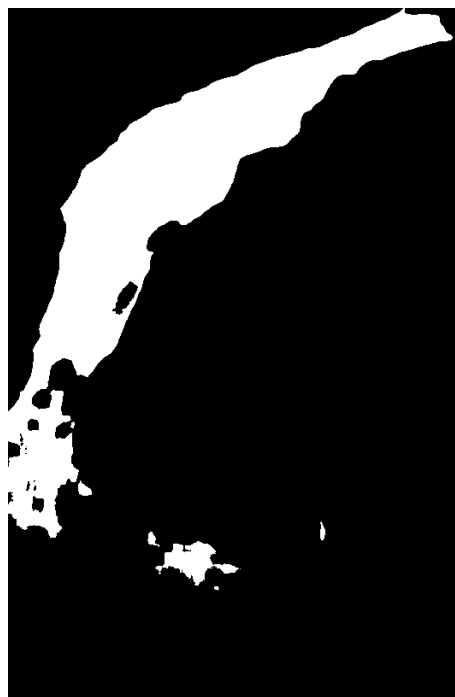


**Figura 22. Imagen satelital clasificada**

Posteriormente, un proceso de segmentación basado en color fue realizado sobre la imagen clasificada (ver Figura 22), el resultado del proceso es una imagen binaria que codifica con color blanco el derrame de hidrocarburo y con color negro las zonas continental y oceánica. Para realizar la medición del área de afectación del derrame de

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>84</b> de <b>107</b> |

hidrocarburo un proceso de conteo de píxeles de interés fue realizado, el proceso consiste en contabilizar cuántos píxeles blancos existen en la escena y multiplicarlo por un factor de  $1E-4\text{Km}^2$ . Para el ejemplo mostrado en la Figura 23, el área de afectación equivale a  $217.75\text{Km}^2$



**Figura 23. Imagen satelital con clasificación blanco y negro (binaria).**

El rendimiento del entrenamiento de la red neuronal convolucional fue medido a través de las métricas relacionadas con la función de pérdida (Loss) y la precisión (Accuracy), los resultados del proceso son mostrados en la Figura 24.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 85 de 107        |

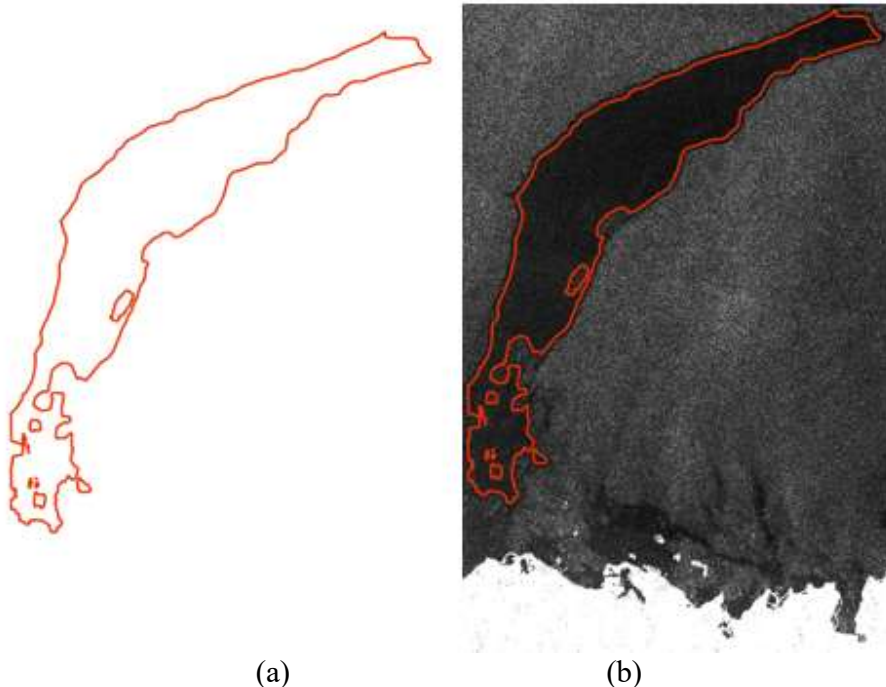


**Figura 24. Evaluación de las métricas de pérdida y precisión en el entrenamiento.**

El resultado del entrenamiento evaluando el coeficiente kappa fue de: 0.89, siendo un resultado positivo para el proyecto y demostrando que el grado de concordancia entre las clases identificadas en el conjunto de datos y las imágenes de prueba tienen una alta similitud, por otro lado, las evaluaciones de las métricas de pérdida y precisión del entrenamiento terminaron con un valor satisfactorio de aproximadamente 0.1 y 0.96 respectivamente.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>86</b> de <b>107</b> |

En aplicaciones de percepción remota satelital los formatos tipo ráster (ver Figura 23) tienden a ocupar grandes volúmenes de información, los archivos vectoriales son por excelencia la mejor manera de presentar los resultados obtenidos. En esta investigación, los resultados de las detecciones de los derrames de hidrocarburos son convertidos a formato vectorial con el objeto de que puedan ser utilizados en diferentes plataformas de software de información geográfica (GIS o SIG). El resultado del proceso puede ser visualizado a través de la Figura 25.



**Figura 25. Visualización de archivo vectorial sobre la imagen satelital tipo ráster.**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>87</b> de <b>107</b> |

En la figura 25, se puede observar dos imágenes denominadas (a) y (b). La imagen (a) es el archivo vectorial producido por la detección de los bordes de los derrames de hidrocarburo, y la imagen (b) se puede visualizar el archivo vectorial sobre una imagen satelital, facilitando la visualización del siniestro marítimo.

#### 4.2. Detección de la línea costera

Un proceso derivado de la clasificación de coberturas de las imágenes Sentinel-1 fue identificado y relacionado con la posibilidad de detectar la línea costera. El proceso se basa en la detección de los bordes o cambios espectrales sobre las imágenes segmentadas o etiquetadas (ver Figura 26), para dicho proceso se tendrán en cuenta las etiquetas representadas en la Tabla 2.

**Tabla 2. Caracterización de las clases escogidas para el proceso de detección de línea de costa**

| Cobertura   | Clase | Color asignado                                                                        |
|-------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Continental | 0     |  |
| Océano      | 1     |  |

Un filtro Canny fue realizado para la detección de bordes teniendo como base los cambios espectrales que se tienen en las imágenes clasificadas, un ejemplo para una mejor visualización es presentado en el Figura 25.

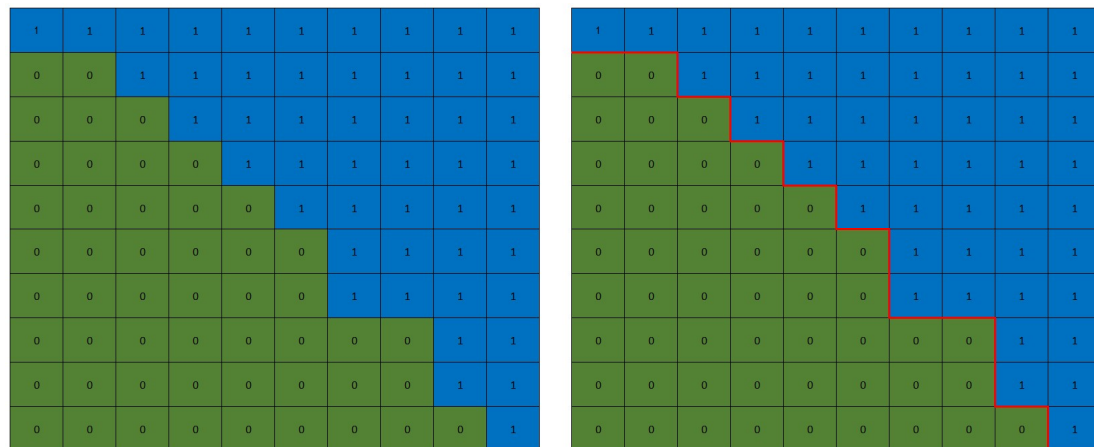
|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>88</b> de <b>107</b> |

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

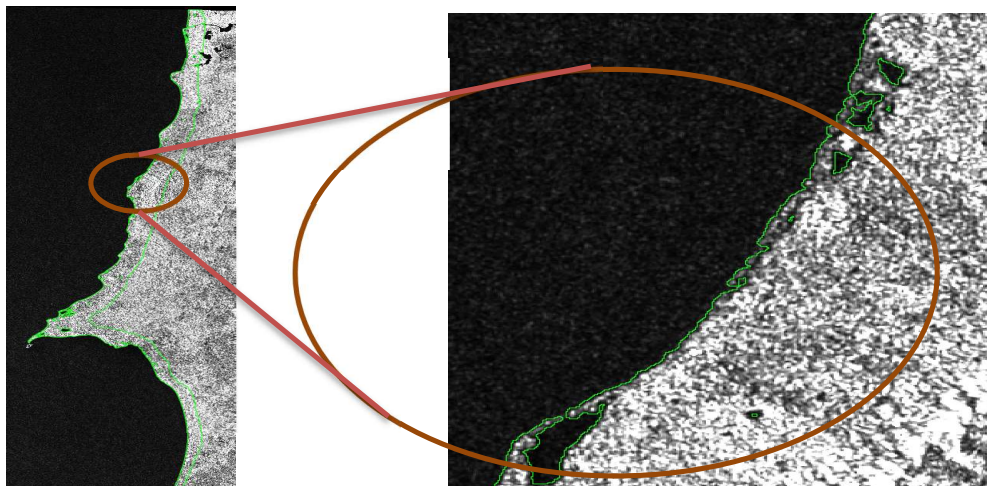
**Figura 26: imagen que maximiza los valores digitales contenidos en los resultados de los procesos de clasificación de las imágenes Sentinel-1.**

El sistema implementado en esta investigación aplicó una detección de bordes sobre una región costera, identificando los cambios en las clases o coberturas, los resultados a modo de ejemplo, son presentados en la Figura 27.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>89</b> de <b>107</b> |



**Figura 27. Imagen de detección de línea de costa.**

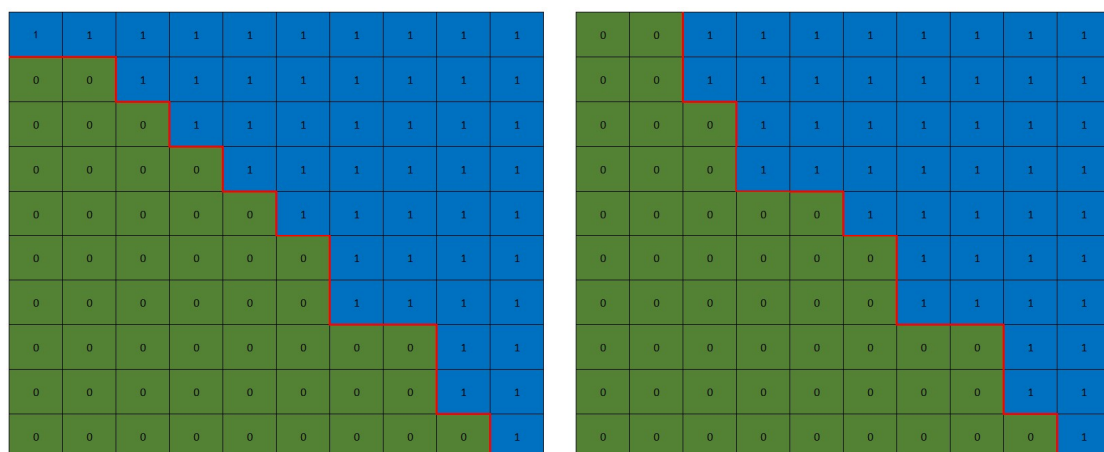


**Figura 28. Visualización de la línea de costa en imagen satelital.**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>90</b> de <b>107</b> |

En la Figura 28, se observa en color verde el proceso de detección de línea costera en una región perteneciente a la ciudad de Cartagena – Colombia. La detección automática de dicha región favorece a entidades como la DIMAR en el proceso de monitoreo costero de las zonas en las que tienen jurisdicción.

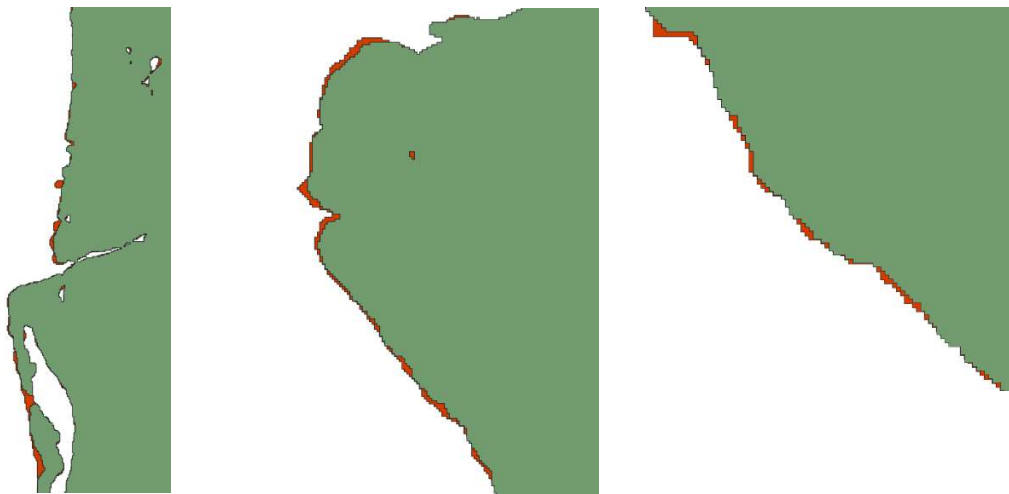
En esta investigación se pretende generar la mayor cantidad de información relacionada con las imágenes satelitales Sentinel-1, por tales motivos, se identifica un nuevo producto relacionado con la detección de zonas de erosión y acreción costera. El sistema consiste en utilizar el modelo entrenado de la clasificación de derrames de hidrocarburos aplicándolo a diferentes escenas de Sentinel-1 correspondientes a los años 2019 y 2020, con el fin de ejemplificar el proceso se presenta la Figura 29.



**Figura 29. Ejemplos de dos clasificaciones de línea costera para el año 2019 y 2020.**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                      |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021        |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>91</b> de <b>107</b> |

En la Figura 29, se observa como la detección de la línea de costa, para una misma escena, cambia con respecto a la variación anual, es decir que se pueden identificar procesos de erosión (pérdida de playa) y acreción (ganancia de playa) costera. Mediante un sistema de detección de cambios basándose en la clasificación de los dos años (sobre una región perteneciente a la Cuenca Pacífica Colombiana: Cartagena) se generan los mapas de afectación costera (ver Figura 30).



**Figura 30. Detección de zonas de erosión costera sobre una región perteneciente a la ciudad de Cartagena (Colombia).**

El sistema de detección de cambios tiene en cuenta mediante operaciones matemáticas entre los contenidos espectrales de los píxeles de cada escena correspondiente a los diferentes años, si la resta es positiva es considerado que un proceso de acreción ha ocurrido, si la resta es cero entonces no existe un cambio significativo en

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 92 de 107        |

la zona costera, mientras que si la resta es negativa un proceso de erosión es detectado

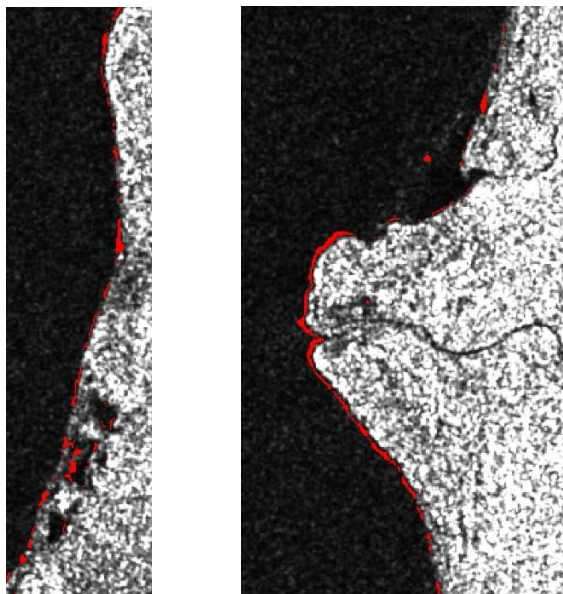
(ver Figura 31).

|              |              |       |               |       |       |       |       |       |       |
|--------------|--------------|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>1-0=1</b> | <b>1-0=1</b> | 1-1=0 | 1-1=0         | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 |
| 0-0=0        | 0-0=0        | 1-1=0 | 1-1=0         | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 |
| 0-0=0        | 0-0=0        | 0-0=0 | 1-1=0         | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 |
| 0-0=0        | 0-0=0        | 0-0=0 | <b>0-1=-1</b> | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 |
| 0-0=0        | 0-0=0        | 0-0=0 | 0-0=0         | 0-0=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 |
| 0-0=0        | 0-0=0        | 0-0=0 | 0-0=0         | 0-0=0 | 0-0=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 |
| 0-0=0        | 0-0=0        | 0-0=0 | 0-0=0         | 0-0=0 | 0-0=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 | 1-1=0 |
| 0-0=0        | 0-0=0        | 0-0=0 | 0-0=0         | 0-0=0 | 0-0=0 | 0-0=0 | 0-0=0 | 1-1=0 | 1-1=0 |
| 0-0=0        | 0-0=0        | 0-0=0 | 0-0=0         | 0-0=0 | 0-0=0 | 0-0=0 | 0-0=0 | 1-1=0 | 1-1=0 |
| 0-0=0        | 0-0=0        | 0-0=0 | 0-0=0         | 0-0=0 | 0-0=0 | 0-0=0 | 0-0=0 | 0-0=0 | 1-1=0 |

**Figura 31. Sistema de detección de acreción o erosión de la línea de costa**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 93 de 107        |

Los resultados del sistema de detección de cambios son convertidos a archivos vectoriales y pueden ser mostrados sobre las imágenes satelitales Sentinel-1, en la Figura 32, se observan las zonas erosionadas de playa, utilizando el sistema de cuantificación de las áreas afectadas se obtiene que las zonas erosionadas están alrededor de 0.8032Km<sup>2</sup>



**Figura 32. Áreas erosionadas sobre una región de Cartagena (Colombia).**

Finalmente, se muestran en la Figura 33 sobre un lienzo de Google Maps las áreas de afectación costera relacionadas con la acreción (color verde) y erosión (color rojo).

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 94 de 107        |



**Figura 33. Áreas de acreción y erosión costera en Cartagena (Colombia).**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 95 de 107        |

## **Capítulo 5: Conclusiones y trabajos a futuro**

### **5.1. Conclusiones**

Un proceso de construcción de un sistema de detección de derrames de hidrocarburo fue realizado, el sistema utiliza las imágenes satelitales Sentinel-1 y entrena utilizando algoritmos de redes neuronales convolucionales profundas. A continuación, se describen las conclusiones enfocadas en los objetivos específicos del proyecto y finalmente se presenta las conclusiones derivadas de los resultados adicionales de la investigación.

- a) En el proyecto se construye un conjunto de datos relacionado con imágenes Sentinel-1 buscando un mejor rendimiento en la detección de derrames de hidrocarburos para la Cuenca Pacífica Colombiana, el conjunto de datos se ve potencializado debido a la inmunidad a la nubosidad del satélite Sentinel-1.
- b) Las imágenes satelitales Sentinel-1 adquiridas en el proyecto fueron pre-procesadas para obtener imágenes en una correcta geometría, con una resolución espacial adecuada para la detección de derrames de hidrocarburos. Además, se aplica un filtro de mediana para reducir el ruido speckle de las imágenes.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 96 de 107        |

- c) Un modelo de clasificación de imágenes satelitales de radar fue realizado, el rendimiento del proceso fue medido con el coeficiente Kappa = 0.89 y con métricas de pérdida y precisión de 0.1 y 0.96 respectivamente.
- d) Se implementa algoritmos de detección de cambios para la generación de mapas de afectación costera relacionados con los procesos de erosión y acreción sobre una región perteneciente a la Cuenca Pacífica Colombiana. Además, se implementa algoritmos para la cuantificación de áreas afectadas teniendo como base la georreferenciación y tamaño de píxel de las imágenes Sentinel-1.
- e) Se identifica que los archivos ráster consumo gran cantidad de espacio en disco, razón por la cual esta investigación presenta todos sus productos resultantes en archivos vectorial que pueden ser cargados en diferentes plataformas de software de información geográfica.
- f) Se implementa un algoritmo para la detección de bordes o cambios de intensidad espectral relacionados con las coberturas continental y oceánica permitiendo la detección de la línea costera.
- g) Se determinó que mediante la implementación del sistema desarrollado se puede hacer un reconocimiento de derrames de hidrocarburo en zonas de mar abierto utilizando información satelital y redes neuronales convolucionales

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 97 de 107        |

implementando la arquitectura LeNet que posee un bajo consumo de recursos computacionales. Los resultados de la clasificación muestran una precisión superior al 95%, y se obtiene con las clasificaciones de información de alto nivel como la cuantificación del derrame de hidrocarburos, la medición del área afectada, además, se crea la detección de línea de costa e información asociada al evento.

## 5.2. Trabajos a futuro

- a) Mejorar el ajuste de los hiperparámetros relacionados con el proceso de entrenamiento de un modelo de red neuronal profunda para lograr incrementar las métricas de validación favoreciendo los procesos de detección de derrames de hidrocarburos.
- b) Generar simulaciones de las posibles trayectorias de los derrames de hidrocarburos en el océano teniendo en cuenta las variables del viento y de las corrientes oceánicas.
- c) Generar mapas de afectación relacionados con las detecciones de derrames de hidrocarburos en zonas de mar abierto calculando el impacto marino sobre las regiones.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 98 de 107        |

### Referencias

- [1] W. G. Meinschein (2), “Origin of Petroleum,” *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, vol. 43, no. 5, pp. 925–943, May 1959, doi: 10.1306/0BDA5CF9-16BD-11D7-8645000102C1865D.
- [2] J. I. Mohammed, A. Karimu, V. O. Fiador, and J. Y. Abor, “Oil revenues and economic growth in oil-producing countries: The role of domestic financial markets,” *Resour. Policy*, vol. 69, p. 101832, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101832.
- [3] J. M. Lane and M. Pretes, “Maritime dependency and economic prosperity: Why access to oceanic trade matters,” *Mar. Policy*, p. 104180, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.marpol.2020.104180.
- [4] J. M. Lane and M. Pretes, “Maritime dependency and economic prosperity: Why access to oceanic trade matters,” *Mar. Policy*, p. 104180, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.marpol.2020.104180.
- [5] H. Singh, N. Bhardwaj, S. K. Arya, and M. Khatri, “Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials,” *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, vol. 14. Elsevier B.V., p. 100305, Dec. 01, 2020, doi: 10.1016/j.enmm.2020.100305.
- [6] J. J. Walsh, J. M. Lenos, B. Darrow, A. Parks, and R. H. Weisberg, “Impacts of combined overfishing and oil spills on the plankton trophodynamics of the West Florida shelf over the last half century of 1965–2011: A two-dimensional simulation analysis of biotic state transitions, from a zooplankton- to a bacterioplankton-modulated ecosystem,” *Cont. Shelf Res.*, vol. 116, pp. 54–73, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.csr.2016.01.007.
- [7] A. Dabrowska, N. A. Kamennaya, B. J. Murton, and M. V. Zubkov, “Impact of ferromanganese ore pollution on phytoplankton CO<sub>2</sub> fixation in the surface ocean,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 146, pp. 1002–1006, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.07.062.
- [8] T. Chouvelon *et al.*, “Patterns of trace metal bioaccumulation and trophic transfer in a phytoplankton-zooplankton-small pelagic fish marine food web,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 146, pp. 1013–1030, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.07.047.
- [9] M. Goni-Urriza *et al.*, “Consequences of contamination on the interactions between phytoplankton and bacterioplankton,” *Chemosphere*, vol. 195, pp. 212–222, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.12.053.
- [10] Y. Chen, Y. Li, and J. Wang, “An end-to-end oil-spill monitoring method for multisensory satellite images based on deep semantic segmentation,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 3, Feb. 2020, doi: 10.3390/s20030725.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 99 de 107        |

- [11] “Detectores de fugas y derrames - Combustibles e hidrocarburos en agua - Division Oil & gas.” <https://www.dastecsrl.com.ar/divisiones/oil-gas/combustibles-e-hidrocarburos-en-agua/detectores-de-fugas-y-derrames> (accessed Mar. 03, 2021).
- [12] “Servicios - instamarilessas.” <http://instamarilessas.net/servicios/> (accessed Mar. 03, 2021).
- [13] “Orbital EOS | Transforming space data into actionable insights.” <https://www.orbitaleos.com/> (accessed Mar. 03, 2021).
- [14] D. Cantorna, C. Dafonte, A. Iglesias, and B. Arcay, “Oil spill segmentation in SAR images using convolutional neural networks. A comparative analysis with clustering and logistic regression algorithms,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 84, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105716.
- [15] M. F. Fingas and C. E. Brown, “Review of oil spill remote sensing,” *Spill Science and Technology Bulletin*, vol. 4, no. 4. Elsevier BV, pp. 199–208, Jan. 01, 1997, doi: 10.1016/S1353-2561(98)00023-1.
- [16] “Orbital EOS | Transforming space data into actionable insights.” <https://www.orbitaleos.com/> (accessed Mar. 03, 2021).
- [17] L. Corucci, F. Nardelli, and M. Cococcioni, “Oil spill classification from multi-spectral satellite images: exploring different machine learning techniques,” in *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions 2010*, Oct. 2010, vol. 7825, p. 782509, doi: 10.1117/12.864556.
- [18] S. Patin, “Environmental Impact of Crude Oil Spills,” in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, 2013.
- [19] “¿Cuál es el verdadero impacto de un derrame de petróleo? - BBC News Mundo.” [https://www.bbc.com/mundo/internacional/2010/04/100428\\_derrame\\_petroleo\\_claves\\_lp](https://www.bbc.com/mundo/internacional/2010/04/100428_derrame_petroleo_claves_lp) (accessed Oct. 15, 2020).
- [20] S. K. Chaturvedi, S. Banerjee, and S. Lele, “An assessment of oil spill detection using Sentinel 1 SAR-C images,” *J. Ocean Eng. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 116–135, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.joes.2019.09.004.
- [21] K. Topouzelis and S. Singha, “Oil Spill Detection Using Space-Borne Sentinel-1 SAR Imagery,” in *Oil Spill Science and Technology: Second Edition*, Elsevier Inc., 2017, pp. 387–402.
- [22] D. Cantorna, C. Dafonte, A. Iglesias, and B. Arcay, “Oil spill segmentation in SAR images using convolutional neural networks. A comparative analysis with clustering and logistic regression algorithms,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 84, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105716.
- [23] D. Cantorna, C. Dafonte, A. Iglesias, and B. Arcay, “Oil spill segmentation in SAR images using convolutional neural networks. A comparative analysis with clustering and logistic regression algorithms,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 84, Nov.

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 100 de 107       |

- 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105716.
- [24] M. Krestenitis, G. Orfanidis, K. Ioannidis, K. Avgerinakis, S. Vrochidis, and I. Kompatsiaris, “Oil spill identification from satellite images using deep neural networks,” *Remote Sens.*, vol. 11, no. 15, Aug. 2019, doi: 10.3390/rs11151762.
- [25] D. Cantorna, C. Dafonte, A. Iglesias, and B. Arcay, “Oil spill segmentation in SAR images using convolutional neural networks. A comparative analysis with clustering and logistic regression algorithms,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 84, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105716.
- [26] M. Jagdish, “Advance synthetic aperture radar images for characterization of oil spills disaster in ocean using Daubechies analysis,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Jan. 2020, vol. 1432, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/1432/1/012069.
- [27] Y. Chen, Y. Li, and J. Wang, “An end-to-end oil-spill monitoring method for multisensory satellite images based on deep semantic segmentation,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 3, Feb. 2020, doi: 10.3390/s20030725.
- [28] A. L. Balogun, S. T. Yekeen, B. Pradhan, and O. F. Althuwaynee, “Spatio-temporal analysis of oil spill impact and recovery pattern of coastal vegetation and wetland using multispectral satellite Landsat 8-OLI imagery and machine learning models,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 7, Apr. 2020, doi: 10.3390/rs12071225.
- [29] P. Pushkar, L. Aggarwal, M. Saad, A. Maheshwari, H. Awasthi, and P. Nagrath, “Object identification in satellite imagery and enhancement using generative adversarial networks,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1166, pp. 643–657, doi: 10.1007/978-981-15-5148-2\_57002E
- [30] L. Corucci, F. Nardelli, and M. Cococcioni, “Oil spill classification from multi-spectral satellite images: exploring different machine learning techniques,” in *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions 2010*, Oct. 2010, vol. 7825, p. 782509, doi: 10.1117/12.864556.
- [31] H. Singh, N. Bhardwaj, S. K. Arya, and M. Khatri, “Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials,” *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, vol. 14. Elsevier B.V., p. 100305, Dec. 01, 2020, doi: 10.1016/j.enmm.2020.100305.
- [32] “La Percepción Remota.” <http://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=706> (accessed Oct. 17, 2020).
- [33] “Radar Satellite | NASA’s Earth Observing System.” <https://eosps.gsfc.nasa.gov/missions/radar-satellite> (accessed Oct. 17, 2020).
- [34] R. Álvarez-Ruiz and Y. Picó, “Analysis of emerging and related pollutants in

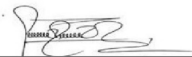
|                                                                                   |                                                                                                                       |                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>                 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1                       |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página <b>101</b> de <b>107</b> |

- aquatic biota,” *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, vol. 25. Elsevier B.V., p. e00082, Mar. 01, 2020, doi: 10.1016/j.teac.2020.e00082.
- [35] H. Singh, N. Bhardwaj, S. K. Arya, and M. Khatri, “Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials,” *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, vol. 14. Elsevier B.V., p. 100305, Dec. 01, 2020, doi: 10.1016/j.enmm.2020.100305.
- [36] H. Kaushal and G. Kaddoum, “Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 1. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 57–96, Jan. 01, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2603518.
- [37] “El Amazonas SageMaker Guía para desarrolladores,” 2020.
- [38] “Clasificación de imágenes de satélite mediante autómatas celulares - Dialnet.” <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=111649> (accessed Jun. 29, 2021).
- [39] “(No Title).” <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11863/fichero/PFC%252FCapitulo+V.pdf> (accessed Jun. 29, 2021).
- [40] “(No Title).” [https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/noticias/2.\\_jurisdiccion\\_maritima.pdf](https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/noticias/2._jurisdiccion_maritima.pdf) (accessed Oct. 18, 2020).



|                                                                                   |                                                                                             |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p align="center"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p align="center"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                             | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                             | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                             | Página 103 de 107       |



  
 Sandra Patricia Valencia  
 Vicepresidenta Regional Pacífico de ACIET

  
 Isabel Ramírez Mejía  
 Rectora UnicomfacaUCA

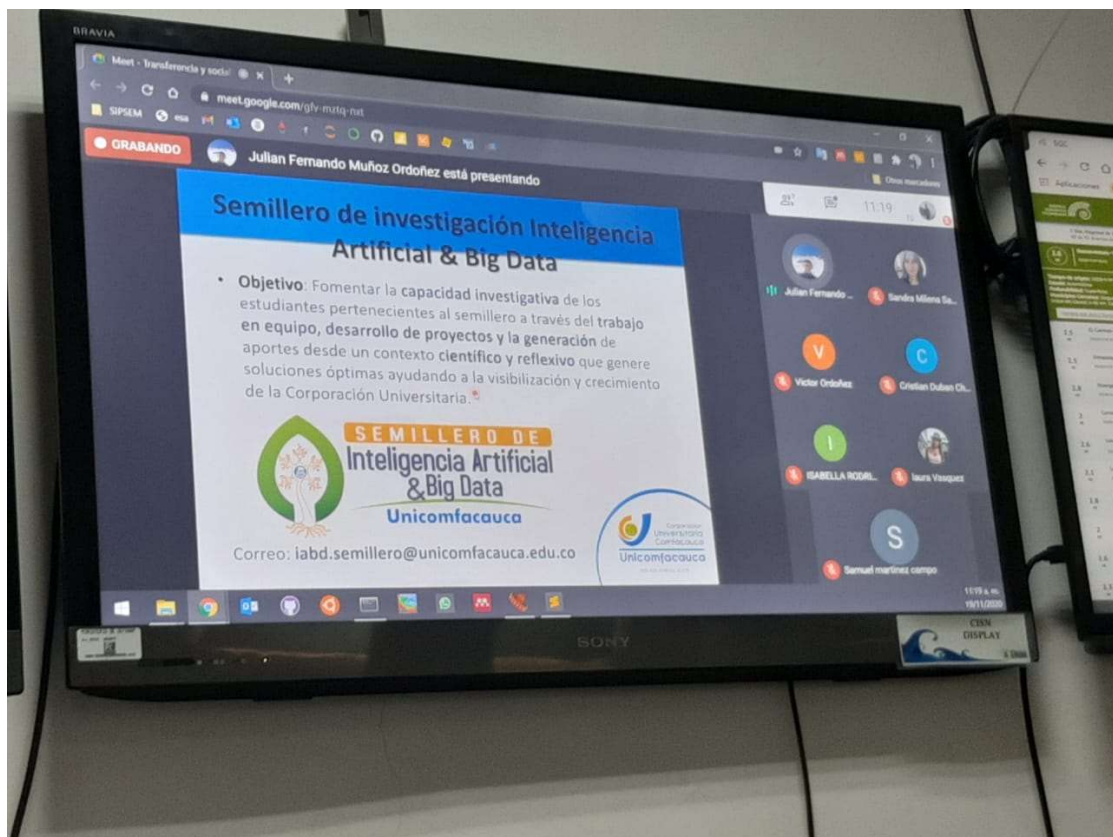
**Figura 35. Certificados de participación como ponentes en el evento Mesasur Pacífico 2021-1 con los resultados del proyecto de investigación.**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 104 de 107       |



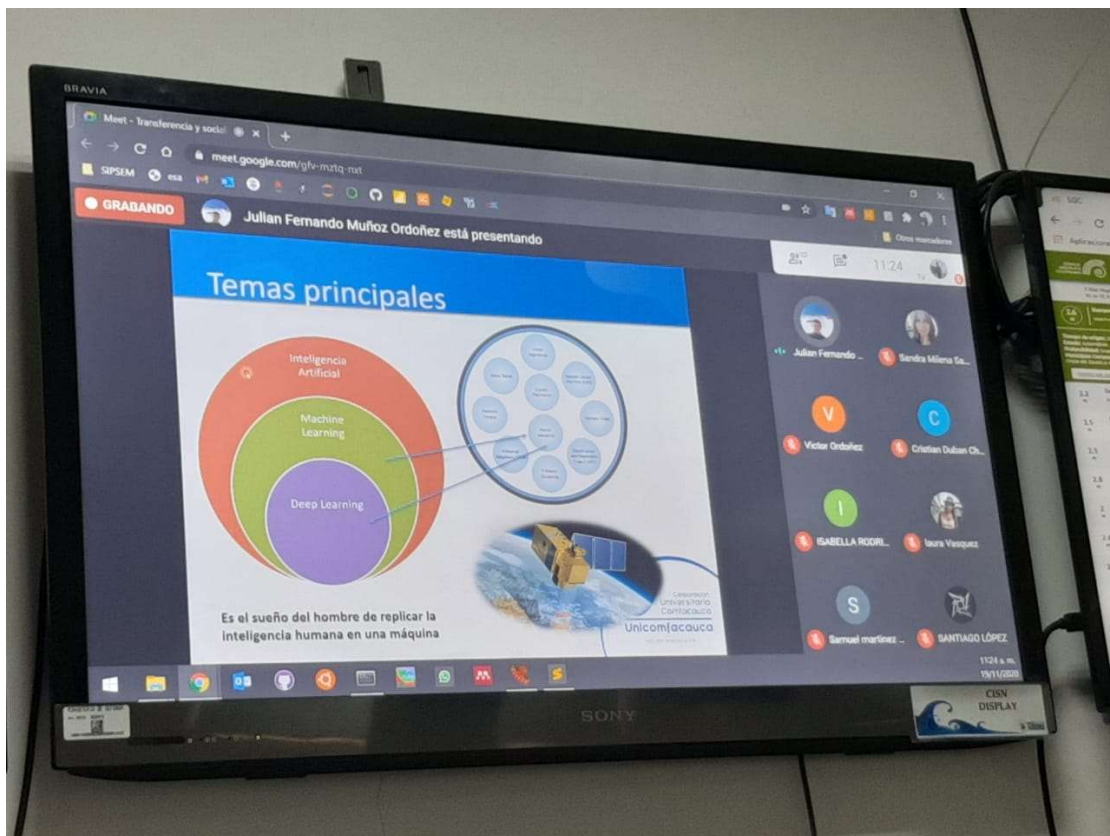
**Figura 36a. Transferencia de conocimiento al grupo de investigación del Área de Oceanografía Operacional (AROPE) perteneciente a la Dirección General Marítima de Colombia de los resultados y avances del proyecto de investigación.**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 105 de 107       |



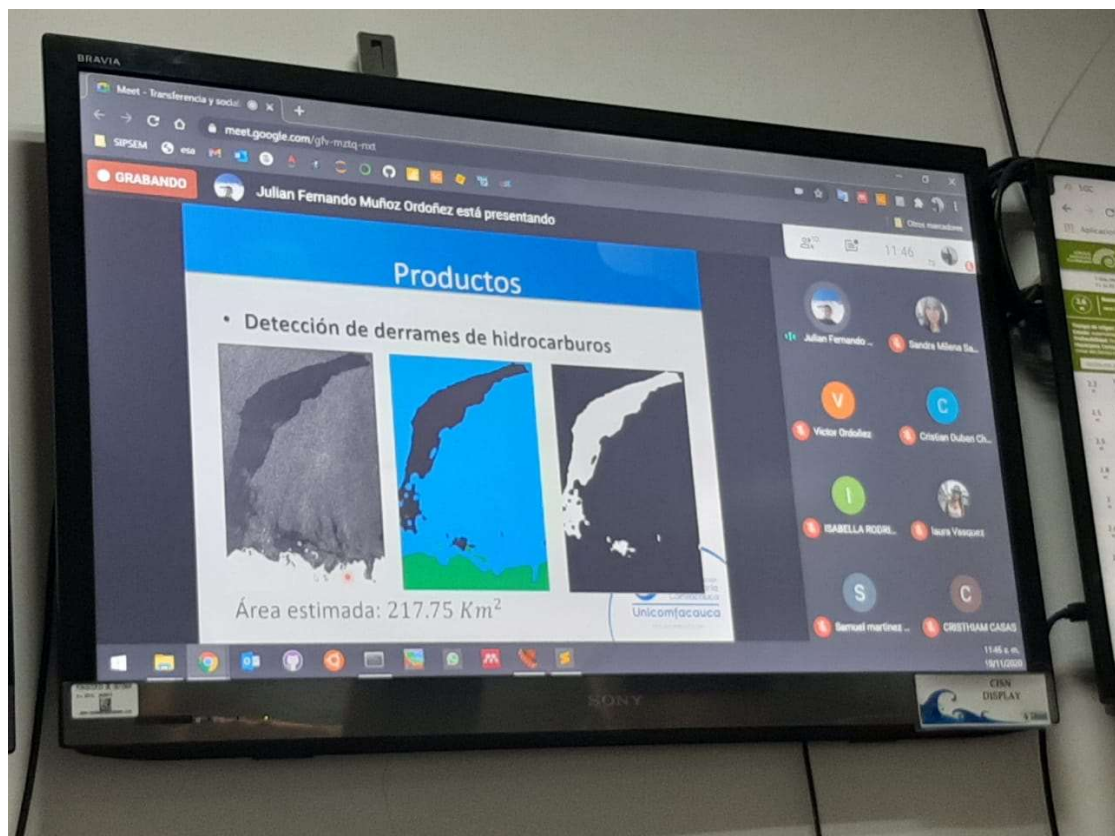
**Figura 36b. Transferencia de conocimiento al grupo de investigación del Área de Oceanografía Operacional (AROPE) perteneciente a la Dirección General Marítima de Colombia de los resultados y avances del proyecto de investigación.**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 106 de 107       |



**Figura 36c. Transferencia de conocimiento al grupo de investigación del Área de Oceanografía Operacional (AROPE) perteneciente a la Dirección General Marítima de Colombia de los resultados y avances del proyecto de investigación.**

|                                                                                   |                                                                                                                       |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|  | <p style="text-align: center;"><b>DOCUMENTO FINAL</b></p> <p style="text-align: center;"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> | <b>EDO – 02</b>         |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Versión 1               |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Vigencia:<br>29/09/2021 |
|                                                                                   |                                                                                                                       | Página 107 de 107       |



**Figura 36d. Transferencia de conocimiento al grupo de investigación del Área de Oceanografía Operacional (AROPE) perteneciente a la Dirección General Marítima de Colombia de los resultados y avances del proyecto de investigación.**