

**MODELAMIENTO DE ESCENARIOS DE INUNDACIÓN UTILIZANDO MODELOS  
DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A PARTIR DE DATOS  
BATIMÉTRICOS Y LIDAR, PARA EL MUNICIPIO DE TUMACO, NARIÑO**

**CINDY TATIANA ECHEVERRY ROJAS  
ERIKA JOHANNA TÉLLEZ ÁVILA**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2017**

**MODELAMIENTO DE ESCENARIOS DE INUNDACIÓN UTILIZANDO MODELOS  
DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A PARTIR DE DATOS  
BATIMÉTRICOS Y LIDAR, PARA EL MUNICIPIO DE TUMACO, NARIÑO**

**CINDY TATIANA ECHEVERRY ROJAS  
ERIKA JOHANNA TÉLLEZ ÁVILA**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar  
al título de Especialista en Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2017**

## CONTENIDO

CONTENIDO .....	3
LISTA DE FIGURAS .....	6
LISTA DE TABLAS .....	8
LISTA DE ANEXOS .....	9
GLOSARIO .....	10
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
1. ÁREA PROBLEMÁTICA.....	15
1.1. DESCRIPCIÓN.....	15
1.2. DELIMITACIÓN .....	15
1.3. FORMULACIÓN .....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. MARCO TEÓRICO .....	18
4.1. PERCEPCIÓN REMOTA.....	18
4.1.1. Definición .....	18
4.1.2. Sensores remotos .....	18
4.2. LiDAR (Light Detection and Ranging).....	19
4.2.1. Definición .....	19
4.2.2. Componentes de un sistema LiDAR .....	19
4.2.3. Funcionamiento de un sistema LiDAR .....	19
4.2.4. Tipos de sensores LiDAR.....	21
4.2.5. Formatos de Archivos de Datos LiDAR (LAS).....	22
4.3. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN LiDAR, TIPO TERRENO.....	23
4.4. MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN A PARTIR DE PUNTOS .....	24
4.4.1. Métodos de interpolación determinísticos .....	24
4.4.2. Métodos probabilísticos.....	25
4.4.3. Interpolación local mediante TIN .....	25

4.5.	BATIMETRÍA .....	26
4.6.	COTA CERO .....	26
4.7.	COTA DE INUNDACIÓN .....	27
4.7.1.	Definición.....	27
4.7.2.	Metodologías de determinación de Cota de Inundación.....	28
4.8.	MODELO GEOIDAL DE COLOMBIA: GEOCOL2004 .....	28
4.9.	AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO .....	31
4.9.1.	Amenaza.....	31
4.9.2.	Vulnerabilidad .....	32
4.9.3.	Riesgo.....	33
4.10.	AMENAZAS COSTERAS .....	34
4.10.1.	Tsunamis .....	34
4.10.2.	Aumento crítico del nivel del mar por efectos meteorológicos .....	35
4.11.	MARCO GEOGRÁFICO .....	41
4.11.1.	Localización geográfica .....	41
4.11.2.	Hitos históricos.....	42
4.11.3.	Aspecto sociocultural y económico .....	42
4.11.4.	Aspectos físicos .....	44
4.11.5.	Amenazas naturales .....	45
4.12.	ANTECEDENTES .....	45
5.	METODOLOGÍA .....	51
5.1.	PROCEDIMIENTO .....	52
5.1.1.	Fase 1. Preparación de insumos.....	52
5.1.2.	Fase 2. Validación de la información.....	52
5.1.3.	Fase 3. Generación de modelo digital a partir de datos Batimétricos .....	53
5.1.4.	Fase 4. Generación de modelo digital a partir de datos LiDAR.....	59
-	Actividad 1. Interpolación de datos LiDAR.....	59
5.1.5.	Fase 5. Elaboración de mosaico de los Modelos Digitales de Terreno .....	63
5.2.6	Fase 6. Modelación de eventos extremos por medio del software ARCSCENE.....	64
6.	RESULTADOS .....	66
6.1.	DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS.....	66

6.1.1. Elaboración de escenario de inundación 1: Nivel medio del mar 16 metros.....	66
6.1.2. Elaboración de escenario de inundación 2: Nivel medio del mar 17 metros.....	69
6.1.3. Elaboración de escenario de inundación 3: Nivel medio del mar 18 metros.....	72
6.1.4. Delimitación de zonas seguras .....	76
6.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	77
7. CONCLUSIONES.....	79
8. RECOMENDACIONES.....	81
9. BIBLIOGRAFÍA.....	82

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Comportamiento de un sistema LiDAR según la superficie .....	21
Figura 2. Visualización de archivos tipo LAS en ArcMap .....	23
Figura 3. Modelo digital de Terreno .....	24
Figura 4. Medición Cota Cero- IDEAM.....	27
Figura 5. Representación cota de inundación.....	28
Figura 6. Tierra, Geoide y Elipsoide.....	29
Figura 7. Altura elipsoidal, geoidal y ortométrica .....	29
Figura 8. Modelo Geoidal GEOCOL2004 .....	31
Figura 9. Efectos de las amenazas naturales .....	32
Figura 10. Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo .....	34
Figura 11. Explicación de la formación de un Tsunami.....	35
Figura 12. Oleaje de mar de viento.....	36
Figura 13. Inundación por marejada ciclónica .....	37
Figura 14. Ciclo de la marea .....	38
Figura 15. Ciclo El Niño .....	39
Figura 16. Localización del municipio de Tumaco .....	41
Figura 17. Metodología del proyecto.....	51
Figura 18. Modelo Digital de Terreno Batimetría en ArcGis 10.5.....	59
Figura 19. Despliegue de datos LiDAR en Global Mapper .....	60
Figura 20. Filtrado de datos LiDAR por suelo y agua. ....	60
Figura 21. Modelo Digital de Terreno en software Global Mapper.....	61
Figura 22. Modelo Digital de Terreno en formato ráster .....	61
Figura 23. Área de interés para delimitación de MDT LiDAR .....	62
Figura 24. MDT LiDAR de área de interés.....	62
Figura 25. MDT LiDAR a la Izquierda – MDT Batimetría a la Derecha .....	63
Figura 26. Mosaico – compuesto por MDT Lidar y MDT Batimetría. ....	63
Figura 27. Configuración de propiedades capa Polígono. ....	65
Figura 28. Modelo de Inundación Nivel Promedio del Mar 15 metros.....	65
Figura 29. Modelo de Inundación Nivel Promedio del Mar 16 metros.....	66
Figura 30. Ventana de configuración ArcScene V.10.5 .....	66
Figura 31. Afectación Isla del Morro - Zona contigua al Aeropuerto La Florida .....	67
Figura 32. Afectación Isla de Tumaco – Zona oriental.....	68
Figura 33. Afectación la de Tumaco - zona noroccidental .....	68
Figura 34. Modelo de Inundación Nivel Promedio del Mar 17 metros.....	69
Figura 35. Afectación Isla del Morro - Cercanía barrio Exporcol.....	70
Figura 36. Afectación Isla del Morro - Zona contigua al Aeropuerto La Florida .....	70
Figura 37. Afectación Isla de Tumaco - Zona oriental.....	71
Figura 38. Afectación Isla de Tumaco - Zona Oriental.....	72
Figura 39. Modelo de Inundación Nivel Promedio del Mar 18 metros.....	72

Figura 40. Ventana de configuración ArcScene Vo.10.5 .....	73
Figura 41. Afectación isla de Tumaco - zona noroccidental.....	73
Figura 42. Afectación Isla de Tumaco -Zona nororiental .....	74
Figura 43. Afectación Isla del Morro - Zona occidental.....	75
Figura 44. Afectación Isla del Morro - Zona oriental .....	75
Figura 45. Zonas seguras Isla de Tumaco.....	76
Figura 46. Zonas seguras Isla del Morro .....	77

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Escala Douglas para caracterizar altura del mar de viento .....	36
Tabla 2. Altura Elipsoidal de Cero Histórico (MLWS) Basado en Modelo GEOCOL 2004 en metros. ....	53
Tabla 3. Resultados Método Distancia Inversa Ponderada .....	54
Tabla 4. Resultados Método Kriging Simple .....	55
Tabla 5. Resultados Kriging Ordinario .....	56
Tabla 6. Resultados Kriging Universal .....	57



## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A. Mapa de Localización General

ANEXO B. Mapa Escenario de inundación 16 metros, Isla de Tumaco.

ANEXO C. Mapa Escenario de inundación 16 metros, Isla del Morro.

ANEXO D. Mapa Escenario de inundación 17 metros, Isla de Tumaco.

ANEXO E. Mapa Escenario de inundación 17 metros, Isla del Morro.

ANEXO F. Mapa Escenario de inundación 18 metros, Isla de Tumaco.

ANEXO G. Mapa Escenario de inundación 18 metros, Isla del Morro.

ANEXO H. Control de calidad sobre datos LiDAR

## GLOSARIO

**Aguas someras:** expresión utilizada por la Organización Hidrográfica Internacional (órgano que regula toda la actividad hidrográfica) al hablar de las aguas poco profundas, es decir, profundidades hasta 30 metros. (Tomado de <https://www.ecured.cu>)

**Amenaza:** Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales (Ley 1523 de 2012).

**Gestión del riesgo:** Es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (Ley 1523 de 2012, art.4).

**Licuación o licuefacción:** Fenómeno originado por el reacomodamiento de las partículas sólidas como resultado de las vibraciones producidas por un sismo. Al reducirse los espacios intergranulares se incrementa la presión de poros, por lo que la presión de contacto entre los granos disminuye, al igual que la resistencia del suelo. Como consecuencia, el suelo se comporta como un líquido denso. Por otro lado, el agua se desplaza hacia la superficie y arrastra partículas de suelo que se acumulan en forma de pequeños volcanes de arena, siendo una de la evidencias más claras de la licuefacción. Otras evidencias del fenómeno son: agrietamientos del suelo, asentamientos diferenciales y desplazamientos laterales del suelo. (Matamoros, 1994)

**Palafitos:** Son una forma especial de viviendas construidas sobre lagos y pantanos. En algunos casos se pueden observar a orillas del mar y en menor escala existen asentados sobre canales. En efecto, se llama palafitos a ciertas viviendas de madera fundamentadas en una serie de palos, estacas o troncos hincados en el fondo sobre lo que se construye una plataforma que sirve de vivienda, elevada y techada con madera, paja u otros materiales endebles (Tomado de <http://www.arkiplus.com/palafito>)

**Reflexión especular:** Ocurre cuando los rayos luminosos que caen en una superficie reflectora muy plana son reflejados de modo que el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado. (Tomado de <http://fisica1m.blogspot.com.co>)

**Riesgo:** Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad. (Ley 1523 de 2012, art. 4).

**Run – up:** Elevación alcanzada por el mar medida en relación con algunos niveles fijos tales como el nivel medio del mar, bajamar media, o el nivel del mar en el momento del tsunami, entre otros; y a la vez, idealmente medida en un punto correspondiente al máximo local de la inundación horizontal. En los lugares donde la elevación no esta medida en relación a la máxima inundación horizontal, ésta es denominada frecuentemente como altura de la inundación (Comisión Oceanográfica Intergubernamental, 2013) .

**Sicigia:** También llamada marea viva, es un tipo de marea que se presenta cuando hay Luna llena o Luna nueva y su posición se encuentra lineada con la Tierra y el Sol (Luna – Tierra –Sol o Tierra – Luna - Sol), en el que la fuerza de atracción de la Luna y el Sol se suma y las mareas son más altas.

**Vulnerabilidad:** Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos (Ley 1523 de 2012, art. 4).

## RESUMEN

**PALABRAS CLAVES:** LiDAR, Tumaco, Batimetría, Modelo Digital de Terreno, Modelo de inundación, MDT, MDE.

El presente proyecto tiene como objetivo generar mapas de diferentes escenarios de inundación para determinar las respectivas zonas seguras, en el casco urbano del municipio de Tumaco, utilizando como insumos un Modelo Digital de terreno generado a partir de datos LIDAR y un Modelo Digital de Elevación generado a partir de datos Batimétricos.

Inicialmente, se buscaron los eventos extremos reportados para el municipio de Tumaco, con el fin de determinar el nivel medio de mar y el nivel del mar asociado a eventos de inundación, con insumos suministrados por la Dirección General Marítima – DIMAR, correspondientes a datos LiDAR, fotografías aéreas e información batimétrica para la zona de estudio. La metodología planteada y desarrollada para este trabajo tuvo como primer paso realizar un control de calidad a los datos LiDAR para garantizar que la información base representara la realidad. Seguidamente, se generó la interpolación de los datos batimétricos para la generación del Modelo Digital de Elevación por medio del paquete de herramientas geoestadísticas de ArcGis; paralelamente, se realizó la interpolación de los datos LiDAR con el software Global Mapper, para la elaboración del respectivo Modelo Digital de Terreno. Posteriormente, se creó un mosaico con la unión de los modelos digitales generados, insumo primordial para modelar los escenarios de inundación. Con la determinación de eventos extremos reportados en estudios previos sobre la zona, se estableció que el nivel medio de mar para el municipio de Tumaco se encuentra en 15 m. y los eventos de sicigia reportados ocurrieron a partir de 16 m., por lo cual se modelaron escenarios para un nivel medio del mar de 16, 17 y 18 metros, utilizando el software ArcScene.

Como resultado se obtuvo una espacialización del aumento del Nivel Medio del Mar en los escenarios mencionados, con su correspondiente análisis, determinando cuáles serían las zonas más afectadas en cada uno, y a su vez las zonas seguras para evacuar en caso de su ocurrencia.

## ABSTRACT

### KEY WORDS:

LiDAR, Tumaco, Bathymetry, Digital Terrain Model, Flood Model, MDT, MDE.

The present project aims to generate maps of different flood scenarios to determine safe areas, in the urban area of the municipality of Tumaco, using as inputs a digital terrain model generated from LIDAR data and a digital elevation model generated at from Bathymetric data.

Initially, the extreme events reported for the municipality of Tumaco were searched in order to determine the average level of sea and sea level associated with flood events with the inputs provided by the Maritime General Directorate - DIMAR, corresponding to data LiDAR, aerial photographs and bathymetric information for the study area. The methodology proposed and developed for this work had as a first step to perform a quality control to the LiDAR data to ensure that the information base represents reality. Next, the interpolation of the bathymetric data was generated for the generation of the Digital Elevation model by means of the geostatic tools package of ArcGis; In addition, LiDAR data interpolation was performed with Global Mapper, for the elaboration of the Digital Terrain Model. Subsequently, a mosaic was created with the union of the generated digital models, primordial input to model the flood scenarios. With the determination of extreme events reported in previous studies on the area, it was established that the mean sea level for the municipality of Tumaco is at 15 m. and reported silicic events occurred from 16 m, whereby scenarios were modeled for a mean sea level of 16, 17 and 18 meters, using ArcScene software.

As a result, an increase in the margin level has been obtained in the scenarios and in the map, with its corresponding analysis determining which are the most affected areas in each one, and in turn the safe areas to evacuate in case of their occurrence.

## INTRODUCCIÓN

Colombia es un país muy susceptible a diversos fenómenos de inundación dada su localización geográfica y amplia red hidrográfica. Las zonas costeras además de ser susceptibles a inundaciones por la presencia de ríos, son vulnerables ante la ocurrencia de ascensos en el nivel del mar causados por diversos factores meteorológicos.

El Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico – CCCP y el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe - CIOH, son dependencias de la Dirección General Marítima – DIMAR, encargadas de realizar investigaciones básicas y aplicadas en disciplinas de Oceanografía e Hidrografía para el conocimiento del mar y océano del país. De la mano de otras entidades, estas dependencias han realizado numerosas investigaciones y estimaciones de riesgos por inundación a causa de tsunamis en el Pacífico y ascensos en el nivel del mar en el Caribe, especialmente en los municipios de Tumaco y Cartagena, respectivamente. Algunas de sus investigaciones han usado dentro de su metodología insumos como Modelos Digitales de Terreno, datos LiDAR y herramientas SIG.

El conocimiento y manejo de herramientas de Sistemas de Información Geográfica es muy eficaz a la hora de representar escenarios de inundación. Técnicas como la percepción remota, permiten tener un conocimiento del territorio y los elementos dispuestos en él para su posterior procesamiento, análisis y representación para la toma de decisiones.

En el presente proyecto se utilizan las herramientas SIG y los datos obtenidos a partir de percepción remota para generar Modelos Digitales de Terreno de la Isla de Tumaco y la Isla del Morro, en el municipio de Tumaco, que presentan antecedentes de la ocurrencia de inundaciones por tsunamis y marejadas, y una alta vulnerabilidad debido a sus condiciones físicas y socioeconómicas. El propósito principal es modelar diferentes escenarios de inundación y definir áreas de evacuación, que serán representados en cartografía clara y fácilmente comprensible por cualquier usuario.

## 1. ÁREA PROBLEMÁTICA

### 1.1. DESCRIPCIÓN

La carencia de cartografía base de precisión en las zonas costeras de Colombia, representa un factor limitante a la hora de determinar las zonas afectadas y zonas seguras para evacuar, ante un escenario de inundación. Actualmente, no hay insumos precisos para delimitar la línea de costa, teniendo en cuenta los cambios constantes que esta sufre por factores de erosión, climatológicos, antrópicos, entre otros.

Uno de los insumos utilizados para la delimitación de la línea de costa, es un Modelo Digital de Terreno creado a partir de métodos fotogramétricos, sin embargo, este no tiene la precisión necesaria para identificar los cambios de altura en superficies cuyas pendientes no son pronunciadas, ya que en zonas planas las curvas de nivel pueden estar muy separadas y al interpolar el Modelo Digital de Terreno los resultados no se ajustan a la realidad, como sucede en las zonas costeras. Además de esto, los métodos fotogramétricos implican un costo elevado y largos plazos de entrega.

### 1.2. DELIMITACIÓN

El cambio climático y la densificación en las zonas costeras, representa un riesgo para la población ante la ocurrencia de desastres naturales, como son las inundaciones. Tumaco es uno de los municipios con mayor vulnerabilidad ante esta situación, debido al establecimiento de un alto porcentaje de asentamientos humanos con construcciones palafíticas<sup>1</sup> en terrenos de bajamar, localizados principalmente en la isla de Tumaco, en la Isla de Morro y en el sector continental del casco urbano de Tumaco; y a la construcción de hoteles y espacios dedicados al turismo en playas. (Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP, 2003) A esta situación, se suman los antecedentes de inundación por aumento en el nivel del mar (de 20 a 40 cms) que se han presentado en el municipio a raíz de la ocurrencia del fenómeno del niño (Alcaldía Municipal de Tumaco, Nariño, 2008).

### 1.3. FORMULACIÓN

Dadas las limitaciones cartográficas que existen en la costa pacífica, ¿cómo se pueden determinar áreas potencialmente inundables con métodos que muestren información que se ajuste a las condiciones reales de la zona y que sirvan como base confiable en la toma de decisiones?

---

<sup>1</sup> Ver glosario.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Generar mapas de tres escenarios de inundación con las respectivas zonas seguras para evacuar en la Isla de Tumaco y la Isla del Morro, en el municipio de Tumaco, utilizando como insumos un Modelo Digital de Terreno generado a partir de datos LIDAR y un Modelo Digital de Elevación generado a partir de datos Batimétricos.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Generar Modelo Digital de Terreno a partir de datos LIDAR.
- Generar Modelo Digital de Elevación a partir de datos de batimetría aportados por la Dirección General Marítima.
- Generar un mosaico a partir del Modelo Digital de Elevación y el Modelo Digital de Terreno, para realizar el modelamiento de escenarios de inundación.
- Determinar los diferentes eventos extremos con el fin de establecer escenarios y magnitudes de los posibles casos de inundación en el área de estudio.
- Delimitar las zonas seguras ante la ocurrencia de escenarios de inundación a un nivel medio del mar de 16m, 17m y 18m., con base en la elevación del terreno y la variación de pleamares y bajamares.



### **3. JUSTIFICACIÓN**

Las zonas costeras presentan una constante variación como producto de la dinámica de factores tales como el cambio climático, la densificación urbana alrededor de la costa, los cambios en el nivel del mar por condiciones de oleaje y mareas, la manifestación de tormentas, lluvias torrenciales y desbordamiento de ríos. Estos factores conducen a situaciones críticas que hacen necesaria la delimitación de zonas seguras ante la ocurrencia de una inundación.

Para determinar las zonas inundables, se debe tener información precisa del terreno, con el fin de identificar las áreas más susceptibles, dependiendo de su altura con respecto al nivel medio del mar. Dado que en las zonas costeras no se cuenta con suficiente información cartográfica para tal fin, es preciso generar modelos digitales de terreno de elevada precisión altimétrica a partir del uso de datos LIDAR, usando el método de interpolación que más se ajuste a las condiciones de la superficie y que presente el menor margen de error en los resultados obtenidos.

La identificación y delimitación de regiones potencialmente inundables en las zonas costeras del país, es primordial para la toma de decisiones y elaboración de planes de gestión del riesgo que incluyan la actuación de todas las entidades públicas pertinentes para reducir las consecuencias negativas y la vulnerabilidad de la población ante la ocurrencia del fenómeno.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. PERCEPCIÓN REMOTA

#### 4.1.1. Definición

La percepción remota se define como la ciencia y arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto. Obtener esta información es posible debido a la interacción energética entre un sensor y la tierra. Esta interacción se puede dar por reflexión, emisión o emisión-reflexión (de energía solar, de un haz energético artificial o por emisión propia), aunque la primera es la forma más importante en Percepción Remota ya que tiene como fuente la luz solar.

La percepción remota permite la elaboración y manipulación de grandes volúmenes de información de la superficie objeto de estudio que sirven de apoyo a múltiples disciplinas y actividades (agrícolas, medioambientales, catastrales, de ordenamiento territorial, militares e industriales) (Chuvieco Salinero, 2008).

#### 4.1.2. Sensores remotos

Instrumentos que permiten capturar información de los objetos sin tener contacto directo con ellos. Generalmente, los sensores son empleados desde aeronaves o satélites, con los que se obtiene información meteorológica, oceanográfica, sobre la cubierta vegetal, etc. Se distinguen dos tipos de sensores:

- Sensor Pasivo. Este tipo de sensores dependen de la energía emitida por una fuente externa, como el sol, que es reflejada por la superficie observada.
- Sensor Activo. Es un sensor que se caracteriza por emitir pulsos de energía o luz, que rebotan sobre la superficie de interés y luego son almacenadas para obtener las características de la superficie estudiada. Las señales reflejadas contienen información para determinar la distancia y dirección de los objetos estudiados y además para generar una imagen de los mismos. El poder de la resolución de este tipo de sensores depende la longitud de onda que este transmita. Este tipo de sensores son los más flexibles puesto que no dependen totalmente de las condiciones exteriores al sistema Sensor – Tierra (Chuvieco Salinero, 2008). En esta clasificación se incluyen los sistemas RADAR y LiDAR.

## 4.2. LiDAR (Light Detection and Ranging)

### 4.2.1. Definición

LiDAR es un Sistema de Percepción Remota Activo que se basa en un sensor láser para obtener información de los elementos o coberturas presentes sobre la superficie terrestre, determinando la distancia entre el objeto emisor y la superficie observada, y mediciones exactas de coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

### 4.2.2. Componentes de un sistema LiDAR

LiDAR cuenta con una serie de instrumentos que permiten la toma y procesamiento de los datos con una alta precisión, tanto para la determinación de posición ( $x,y,z$ ) como para la determinación de distancias:

- Escáner láser (ALS Airborne Laser Scanner): Es el componente principal del sistema LiDAR, encargado de realizar barridos de la superficie terrestre mediante pulsos láser, y generar una nube de puntos que representan las distancias del dispositivo a la superficie observada (Sanchez García, 2012).
- Sistema de Posicionamiento Global (GPS Global Positioning System): Permite posicionar el sistema en tiempo real para determinar su ubicación en cada momento. Los satélites que configuran este sistema de localización, suministran información tridimensional de la posición durante las 24 horas del día en cualquier parte de la superficie terrestre. (Tomás, López Sánchez, & Delgado Marchal, 2005)
- GPS Diferencial: Este instrumento permite aumentar la precisión del posicionamiento del sistema. Esta localizado en tierra y se puede apoyar en estaciones permanentes terrestres para calcular y corregir los errores sistemáticos que se producen en la determinación del movimiento del punto de control. (Tomás, López Sánchez, & Delgado Marchal, 2005)
- Sistema de Navegación Inercial (INS Inertial Navigation System): “Consiste en una unidad de medidas inerciales en la cual los sensores están ligados a una plataforma común, para mantener las mismas orientaciones relativas entre ellos” (Sanchez García, 2012,p.9), este sistema mide las variaciones en la orientación del avión causadas por turbulencias, giros, inclinaciones, etc. Estas mediciones permiten realizar correcciones a los datos tomados.

### 4.2.3. Funcionamiento de un sistema LiDAR

El LiDAR aerotransportado es un equipo que consta de un distanciómetro láser y de un espejo que desvía el haz perpendicularmente a la trayectoria del avión. Este desplazamiento lateral combinado con la trayectoria del avión permite realizar un barrido del terreno. (Ruiz & Kornus, 2003) El sistema LiDAR calcula

la distancia del sensor al terreno observado, a partir del registro del tiempo preciso en el que el pulso láser deja el sistema emisor, alcanza la superficie de interés y regresa al sensor. Esta información, combinada con la información posicional (GPS, INS), el análisis del rango de tiempo láser y el ángulo de escaneo, da como resultado medidas de puntos tridimensionales (x,y,z) reales del objetivo o superficie reflectora de alta precisión.

El LIDAR aerotransportado requiere orientación directa. Trabaja en combinación con un sistema de GPS diferencial (DGPS) y un sistema inercial de navegación (INS). (Ruiz & Kornus, 2003)

Cuando el sistema LiDAR emite la señal laser, ésta se comporta de forma diferente de acuerdo a las características de cada uno de los elementos de la superficie. Un pulso láser puede regresar al sensor como una o muchas señales, si el pulso encuentra varias superficies de reflejo a medida que viaja, se divide en tantas devoluciones como superficies reflectoras encuentre. El primer pulso láser devuelto es el más importante y se asocia con la entidad más grande de la superficie, esta puede ser la copa de un árbol, el techo de un edificio o el suelo (ESRI, s.f.). A continuación se describe el comportamiento de la señal reflejada por diferentes superficies:

- Superficie sólida: La señal es reflejada sin ningún problema. Este tipo de superficies corresponde a suelo, vías, construcciones, etc.
- Cuerpo de agua: La señal puede sufrir una reflexión especular<sup>2</sup> que impide que ésta sea reflejada por la superficie. Para poder obtener datos de este tipo de superficie es necesario realizar una interpolación a partir de alturas (se toman las alturas de los puntos cercanos a la orilla de los cuerpos de agua y la información batimétrica disponible para realizar un cálculo de la forma y altura de la superficie) y/o implementar un sistema LiDAR especializado (LiDAR Batimétrico).
- Cobertura con vegetación: En este tipo de coberturas, parte de las señales son reflejadas por la vegetación (especialmente por las partes altas de los árboles) y la otra parte la atraviesa y llega al suelo para ser reflejada.

---

<sup>2</sup> Ver glosario

**Figura 1.** Comportamiento de un sistema LiDAR según la superficie



**Fuente:** Tomado de [www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/lidar.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/lidar.aspx)

#### 4.2.4. Tipos de sensores LiDAR

Actualmente existen diferentes tipos de Sensores LiDAR a implementar de acuerdo al tipo de estudio o investigación a realizar (Ojeda, Vallejo, Hernández Calvento, & Álvarez Francoso, 2007).

- ***LiDAR Terrestres.*** Son sensores que utilizan un dispositivo laser en una plataforma estática sobre la superficie terrestre (ejemplo: un trípode). Recopila información de múltiples objetos, rotando vertical y horizontalmente, que posteriormente es ordenada y agrupada en un conjunto de puntos. Está apoyada generalmente por una cámara digital (usada para la discriminación e interpretación de los datos colectados en campo).

Este tipo de Sensores LiDAR permiten obtener datos de alta precisión con gran rapidez logrando excelentes niveles de detalle de estructuras y/o elementos del terreno gracias al procesamiento de millones de puntos localizados y dimensionados según un sistema de referencia. Además la toma de datos no depende de las condiciones climáticas (presencia de nubes) de la zona.

Una de las principales desventajas que presenta este sistema es que la toma de datos debe realizarse ubicando el sensor en diferentes posiciones para evitar áreas oscuras sin información (sombras) generadas por la presencia de estructuras y vegetación en la zona y su relación con el ángulo de observación.

- ***LiDAR Aéreo Batimétrico.*** Los LiDAR Aéreo Batimétricos son usados principalmente para el estudio y manejo de cuerpos de agua (ríos, lagos, mares, etc.) a través de la generación de modelos de profundidades

(penetraciones de hasta 50 metros aproximadamente). Se encuentran instalados en plataformas aéreas como aviones, helicópteros, etc.

Este sensor emite señales que pertenecen a la región verde del espectro electromagnético y son apropiados para realizar estudios en aguas que no tengan altos contenidos de sedimentos.

Una de las principales limitaciones que presenta este sistema es que la toma de datos sobre cuerpos de agua se ve limitada por la presencia de espuma originada por el movimiento natural de este elemento, impidiendo la correcta penetración del pulso emitido por el sensor. Dado lo anterior, la precisión posicional que ofrece el sensor es de aproximadamente 10 metros para aguas turbias.

- LiDAR Aéreo Topográfico. Este tipo de sistemas capturan información relacionada con la posición (x, y) y elevación (z) de los elementos sobre la superficie objeto de estudio generando una nube de puntos de alta densidad. Es capaz de proporcionar datos del primer y del segundo retorno permitiendo obtener la altura del terreno y de la vegetación. Se encuentran instalados en plataformas aéreas como aviones, helicópteros, etc.

Este tipo de sensores no dependen de las condiciones atmosféricas de la zona de estudio por lo que la toma y recolección de información puede realizarse en horas nocturnas o en condiciones de visibilidad reducida (tiempo brumoso o nublado). Se apoyan en un Sistema Global de Navegación por Satélite– GNSS, que permite calcular la posición del sensor, y un Sistema de Navegación Inercial – INS, que fija la dirección del pulso láser emitido por el sistema LiDAR.

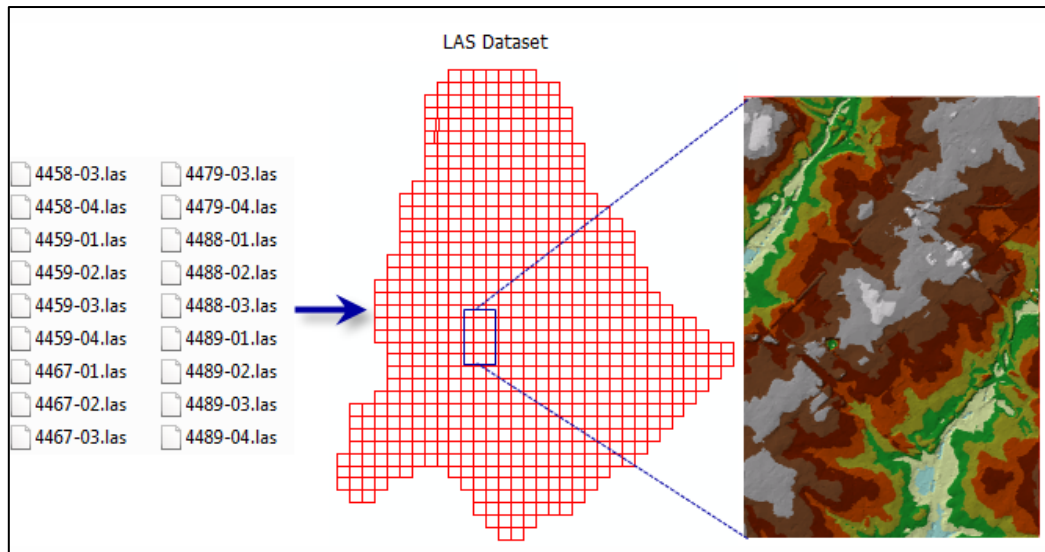
Una de las principales limitaciones que presenta este sistema es que la toma de datos se ve afectada por la presencia de nubes y vapor de agua con alta humedad. Este fenómeno se observa especialmente al estudiar cuerpos de agua y zonas costeras.

#### **4.2.5. Formatos de Archivos de Datos LiDAR (LAS)**

La American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) ha mantenido un formato de intercambio de información 3D para los puntos escaneados por sensores LiDAR llamado LAS (Log ASCII Standard). Este tipo de formato es compatible internacionalmente con aquellos software de manejo de datos LiDAR y una gran cantidad de software geográficos (Tomado de <https://www.filesuffix.com>).

Es un archivo de tipo binario que recopila las coordenadas x, y, z de cada uno de los puntos, así como información relacionada con la intensidad del valor de retorno de la señal.

**Figura 2.** Visualización de archivos tipo LAS en ArcMap



**Fuente:** Tomado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-a-las-dataset-.ht>

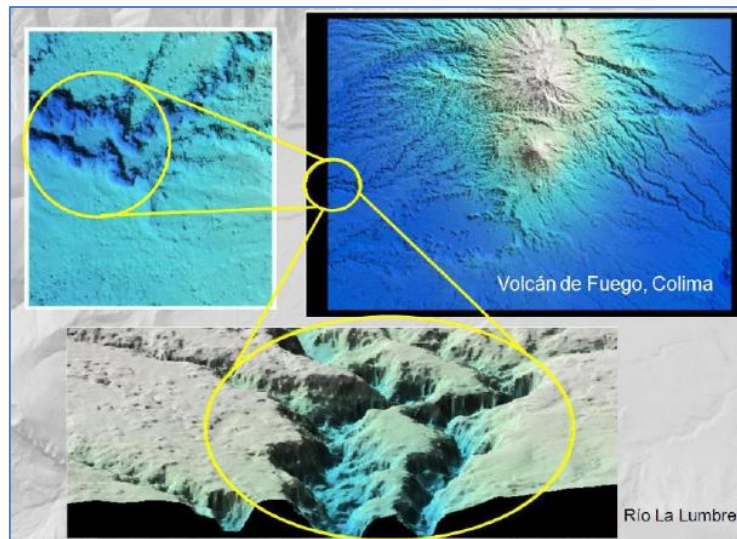
#### **4.3. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN LiDAR, TIPO TERRENO.**

Un Modelo Digital de Terreno es una estructura numérica de datos que representa la distribución de la cota o altura con respecto al nivel del mar. (Sanchez García, 2012)

Un Modelo Digital LiDAR de tipo Terreno se obtiene a partir de una interpolación de la nube de puntos generada con tecnología LiDAR, de los cuales se seleccionan solo los que corresponden al terreno, es decir, no se toman en cuenta los puntos correspondientes a infraestructura, vegetación, u otros elementos encontrados sobre la superficie. (INEGI, s.f.)

A partir de estos modelos se pueden modelar las alturas y obtener entre otros aspectos, pendientes, definir áreas sujetas a inundación, conocer la altura de la vegetación, cálculo de volúmenes de tierra. El nivel de detalle obtenido a partir de modelos digitales de elevación, tipo terreno generados a partir de la Tecnología LiDAR, los hace muy útiles para el análisis de las áreas susceptibles de inundación.

**Figura 3.** Modelo digital de Terreno



Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México

#### 4.4. MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN A PARTIR DE PUNTOS

La interpolación es un procedimiento que predice los valores de las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos. Este proceso es utilizado para predecir valores tales como precipitación, temperatura, elevaciones, niveles de ruido, y cualquier dato almacenado en un punto geográfico, que pueda ser representado como variable continua.

Para generar un Modelo Digital de Elevación a partir de una capa de puntos, es necesario el uso de métodos de interpolación que pueden ser de tipo determinístico o probabilístico.

##### 4.4.1. Métodos de interpolación determinísticos

Estos métodos realizan predicciones en base a fórmulas matemáticas que incorporan la distancia como factor de ponderación. El método de interpolación determinístico más empleado es el de Ponderación de distancia Inversa (IDW), cuyo algoritmo calcula los valores de las celdas por medio de una composición ponderada de los datos de la muestra, el modelo sugiere que el valor predicho reduce su influencia a medida que aumenta la separación entre el punto a evaluar y los puntos de su entorno. (Fernández Palomino & Lavado Casimiro, 2014). El método IDW se basa en la siguiente fórmula (P. Vicente 2008):

$$Z_i = \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot Z_i \quad (1)$$



$$\sum_{i=1}^n k_{ij} = 1 \quad (2)$$

Donde  $Z_j$  es el valor estimado para el punto  $j$ ,  $n$  es el número de puntos usados en la interpolación,  $Z_i$  es el valor  $i$ -ésimo y  $k_{ij}$  es el peso dado al dato  $i$  en el cálculo del nodo  $j$ . Los pesos para cada dato están entre 0 y 1 y la suma total de ellos es la unidad. Con este modelo se da una ponderación o peso mayor a los datos próximos al punto a predecir y una menor a los puntos más alejados.

#### 4.4.2. Métodos probabilísticos

Las predicciones hechas con estos métodos se realizan con base en probabilidades. El grupo de métodos probabilísticos más común es el Kriging, que es un método de estimación que depende de las relaciones espaciales y estadísticas para predecir puntos no medidos (Vicente, 2008). Kriging es un estimador lineal e insesgado del que existe una gran variedad de métodos, entre los que se encuentran los siguientes:

- **Kriging Simple:** Este método asume el conocimiento tanto de la media como de la covarianza de proceso. **(ESRI, s.f.)**
- **Kriging Ordinario:** Es un kriging lineal con valor esperado estacionario pero desconocido. Es un buen método en los casos en que se desconoce el de la media de la variable analizada, permitiendo generalizar el kriging a situaciones donde esta medida no es constante en el tiempo. **(Menéndez Fernández, 2012)**
- **Kriging Universal:** Este método presupone que hay una tendencia de invalidación en los datos, por ejemplo un viento prevaleciente, y puede modelarse a través de la función determinística polinómica que se resta los puntos medidos originalmente. Este método modela la autocorrelación a partir de los errores aleatorios. Una vez que el modelo se ajusta a los errores aleatorios y antes de realizar una predicción, se vuelve a sumar la función polinómica a las predicciones para obtener resultados significativos. **(ESRI, s.f.)**

#### 4.4.3. Interpolación local mediante TIN

Un TIN, es una Red Irregular de Triángulos generados a partir de valores puntuales con el fin de conseguir triángulos que maximicen la relación área/perímetro; el conjunto de todos los triángulos se denomina conjunto convexo.

Este tipo de interpolación se basa en que cada uno de los vértices tienen valores  $X$ ,  $Y$ , y  $Z$  (localización y atributo a modelar) a partir de los cuales se puede obtener el modelo de regresión  $Z = AX + BY + C$  que permite interpolar

la variable Z en cualquier punto del rectángulo. Al igual que el método IDW, el resultado de este método siempre está acotado por los valores máximo y mínimo de Z en los vértices del triángulo y será más parecido al valor del vértice más cercano (Sarria, s.f.).

Este tipo de interpolación es muy utilizada para generar modelos de elevación con excelentes resultados visuales.

#### **4.5. BATIMETRÍA**

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM, una batimetría se refiere al “levantamiento topográfico del relieve de superficies del terreno cubierto por el agua, sea este el fondo del mar o el fondo de los lechos de los ríos, ciénagas, humedales, lagos, embalses, etc. es decir, la cartografía de los fondos de los diferentes cuerpos de agua” (IDEAM,s.f.).

Al igual que en los levantamientos topográficos convencionales, en las batimetrías se determinan las coordenadas X, Y y Z, esta última corresponde a las profundidades de los cuerpos de agua levantados, que es la parte más compleja del levantamiento, esta labor se denomina sondeo o sondar. La profundidad de un punto se obtiene midiendo la distancia vertical entre el nivel del agua y la superficie del fondo. (Farjas Abadía, s.f.)

Dentro de las aplicaciones de los levantamientos batimétricos, se encuentran la recuperación de ríos y playas, la elaboración de cartas de navegación, instalación de tuberías submarinas, conocimiento de la dinámica de los lechos de ríos identificando zonas de socavación y áreas de depósito. Particularmente los levantamientos batimétricos son insumo indispensable para aplicar cualquier software de modelación hidráulica lo cual permite evaluar el tránsito de crecientes con fines de pronóstico hidrológico (IDEAM, s.f.).

#### **4.6. COTA CERO**

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM, “Para el análisis de sistemas hidrológicos continuos es esencial contar con series de niveles que se puedan expresar sobre un mismo nivel de referencia, es decir, cotas sobre el nivel del mar” (IDEAM, 2014). No obstante, Las estaciones operadas por el IDEAM en forma genérica presentan cotas de nivel arbitrarias, que cuentan con un datum de referencia que permite la continuidad de los registros cuando por pérdida, destrucción o reemplazo se dota de nuevas reglillas en el sitio de medición. El proceso de levantamiento de cotas cero para la totalidad de la red hidrométrica del IDEAM está avanzando con tecnologías de posicionamiento satelital y levantamientos topográficos de alta precisión (IDEAM, s.f.).

**Figura 4.** Medición Cota Cero- IDEAM



**Fuente.** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

## **4.7. COTA DE INUNDACIÓN**

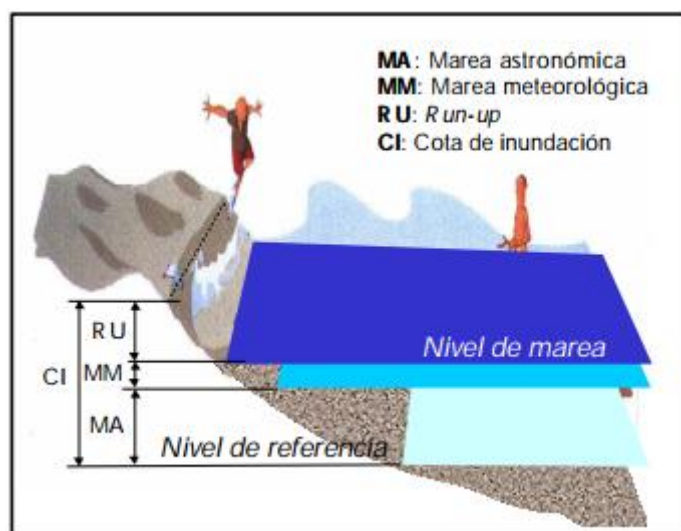
### **4.7.1. Definición**

En el documento Atlas de inundación en el litoral peninsular español, se representa el fenómeno de inundación de acuerdo a la figura 5, explicando que “en un instante determinado, la playa está caracterizada por un nivel de marea (NM) compuesto por la marea astronómica y la marea meteorológica (MA+MM) y una batimetría. Sobre dicho nivel de marea se encuentra el oleaje que, en función de sus características y de la batimetría de la playa, se propaga hacia la costa. Al alcanzar la costa, el oleaje rompe en la playa, produciéndose un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil de playa run-up<sup>3</sup> (RU). Todos estos factores están relacionados entre sí. Además de la interacción entre los elementos (oleaje-batimetría-nivel de marea-ascenso), el fenómeno de la inundación presenta la complicación añadida de que algunos de los factores (oleaje, viento...) son variables aleatorias y, por tanto, su presentación está sujeta a una determinada probabilidad.” (Ministerio de Medio Ambiente, Universidad de Calabria, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Cotas.)

---

<sup>3</sup> Ver glosario.

**Figura 5.** Representación cota de inundación



**Fuente.** Ministerio de Medio Ambiente, Universidad de Calabria, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Cotas

#### 4.7.2. Metodologías de determinación de Cota de Inundación

De acuerdo al “Atlas de inundación en el litoral peninsular español”, los métodos para estimar la cota de inundación pueden dividirse en (Ministerio de Medio Ambiente, Universidad de Calabria, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Cotas.):

- Métodos directos: Se analizan los extremos de los niveles de agua observados.
- Métodos indirectos: Los factores (marea astronómica, marea meteorológica y oleaje) se analizan por separado y el nivel extremo se deduce a partir de ellos. Dentro de estos, se distinguen los métodos indirectos teóricos en los que los factores son combinados de manera teórica a través de sus funciones de distribución y los métodos indirectos de simulación.

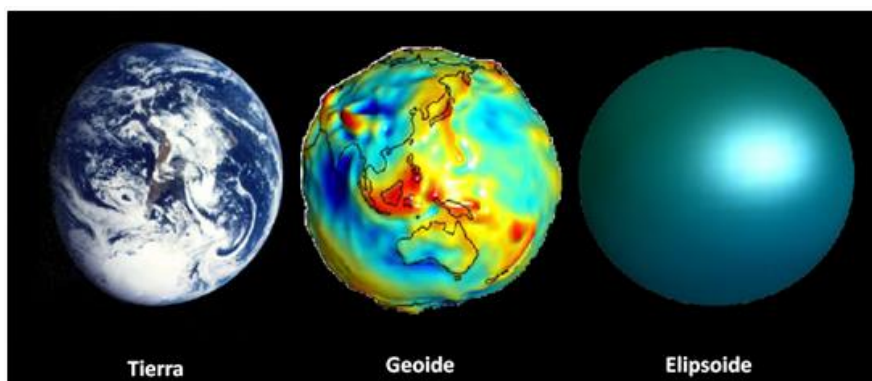
#### 4.8. MODELO GEOIDAL DE COLOMBIA: GEOCOL2004

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC, es la entidad encargada de “reestructurar y ajustar las redes de nivelación, de gravedad y de posicionamiento, con el fin de estructurar una información integrada y actualizada que permita el diseño de un modelo geoidal con mayor precisión, incluyendo la aplicación de nuevas metodologías estadísticas y físico-matemáticas” (IGAC, s.f.). Para abordar el concepto de modelo geoidal, debe tenerse claridad en los siguientes conceptos:

- Elipsoide: es la superficie matemática ideal que mejor representa a la tierra en su forma y tamaño, se asemeja a una esfera con los polos achatados y el ecuador extendido.

- **Geoide:** El Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México define el geoide como la superficie del campo de gravedad de la Tierra, que es aproximadamente igual que el nivel medio del mar y se prolonga por debajo de los continentes cubriendo la Tierra en su totalidad. El Geoide es un modelo físico que busca representar la verdadera forma de la Tierra, calculándola como una superficie del campo de gravedad con potencial constante y es utilizada como referencia para determinar la elevación del terreno. Dado que la masa de la Tierra no es uniforme en todos los puntos y la dirección de gravedad cambia, la forma del geoide es irregular (INEGI, s.f.).

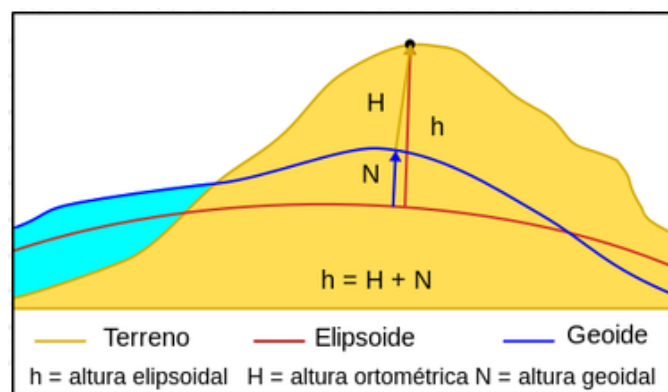
Figura 6. Tierra, Geoide y Elipsoide



Fuente. <http://docplayer.es/23990899-Sig-toma-de-datos-percepcion-remota-necesidad-de-informacion-analisis-interpretacion-mapas-e-informes-el-ciclo-de-la-informacion.html>

- **Alturas elipsoidales:** Son aquellas alturas obtenidas por medio de técnicas de posicionamiento satelital (GNSS: Sistema Global de Navegación por Satélite), estas no involucran efectos físicos en su determinación y sus cálculos están direccionados a un cálculo geométrico.
- **Alturas físicas:** Son las alturas determinadas por medio del proceso de nivelación de precisión, que involucra la intervención de efectos físicos para sus cálculos, como es el efecto que presenta el campo de gravedad para cada uno de los puntos medidos.

Figura 7. Altura elipsoidal, geoidal y ortométrica



Fuente. <http://efemeridesastronomicas.dyndns.org/wgs84.htm>

En línea con lo anterior, para explicar el modelo geoidal, el IGAC aclara que todas las superficies físicas definidas bajo conceptos físicos como lo es el geoide, se refieren a un elipsoide definido y por ello, toda superficie física se representa o tiene origen bajo una superficie matemática establecida con anterioridad.(IGAC, s.f.)

Asimismo, se afirma que las características físicas que se deben de tener presentes para el entendimiento del geoide son las relacionadas a: la gravedad, el campo de gravedad y el potencial gravitatorio.

En términos generales, el modelo geoidal es explicado por el IGAC de la siguiente forma:

Una aproximación del modelo físico de la tierra al geoide es un modelo (cuasi-) geoidal<sup>4</sup>, que es la representación físico-matemática de una superficie relacionada con el campo de gravedad terrestre y su potencial gravitatorio.

La representación gráfica de un modelo (cuasi-) geoidal se realiza mediante un tipo de altura en específico, para realizar el cálculo de un geoide se recurre al uso de ondulaciones geoidales, las cuales son alturas consideradas a partir de un elipsoide de referencia hasta la superficie modelada o geoide. En cambio para efectuar el cálculo de un cuasi-geoide, se recurre al uso de alturas anómalas, las cuales son consideradas a partir de un elipsoide de referencia hasta la superficie modelada o cuasi-geoide.

Un modelo (cuasi-) geoidal proporciona la conexión entre las alturas elipsoidales (referidas a un elipsoide de referencia y calculadas por medio de GNNS) junto a las alturas físicas (referidas a una superficie equipotencial que se asemeja al nivel medio del mar y calculadas por medio de nivelación de precisión). Este modelo permite obtener altura física aproximada para un punto con altura elipsoidal, esta ventaja permite evitar esfuerzos innecesarios en la máxima densificación de las redes de nivelación.

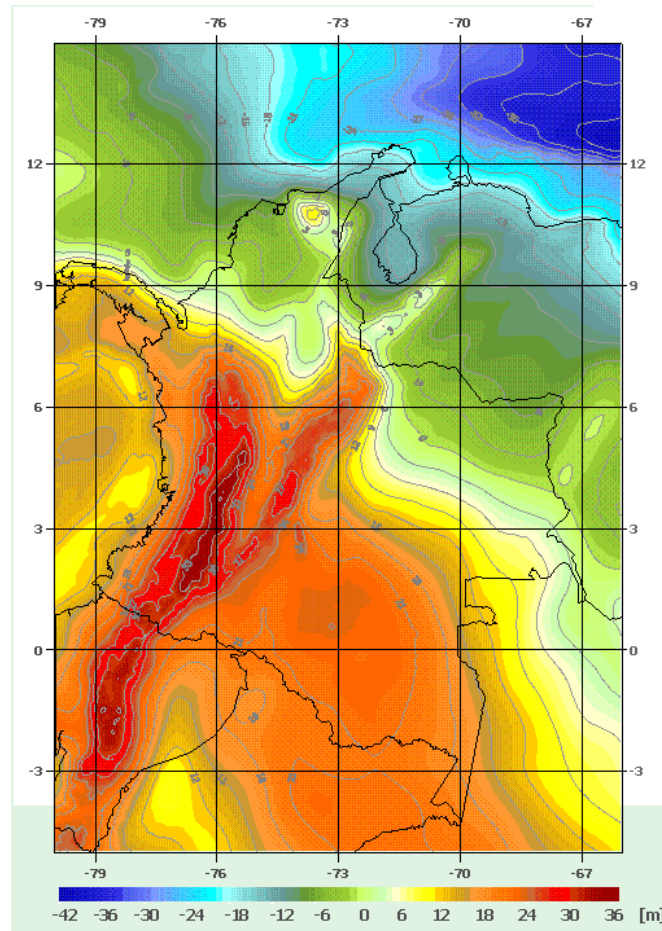
En la actualidad en Colombia, el modelo GEOCOL2004 proporciona las alturas geoidales que se usan en la determinación de alturas físicas. Este modelo se realizó combinando información gravimétrica de diferentes resoluciones, inicialmente tomó como base un modelo global denominado TEG-4 (Texas Earth Gravity 4, Tepley, et al 2001), luego se estandarizaron datos gravimétricos de diferentes fuentes, entre las que se encuentran el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) junto a compañías petroleras e internacionales. A la información de componente global se le agregó la información con componente regional y local en forma de cuadrículas, dando como resultado un modelo geoidal en forma de cuadrícula con una separación entre cada punto consecutivo de 2' entre ondulaciones geoidales. (Tomado de <http://www.igac.gov.co>)

Las alturas geoidales obtenidas con el modelo GEOCOL2004 oscilan entre -24 y 34m.

---

<sup>4</sup> La diferencia entre geoide y cuasi-geoide corresponde al método de cálculo utilizado para su diseño, el geoide está relacionado con la metodología clásica o de Stokes, que requiere la aplicación de un conjunto de hipótesis, mientras que el cuasi-geoide está relacionado con la metodología moderna o de Molodenski, que no requiere incluir hipótesis en la determinación del geoide. En la actualidad no se concibe diferencia notable entre ellas.

**Figura 8.** Modelo Geoidal GEOCOL2004



Fuente. [http://www2.igac.gov.co:8080/igac\\_web/UserFiles/File/MAGNAWEB\\_final/Geocol2004.htm](http://www2.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/MAGNAWEB_final/Geocol2004.htm)

## 4.9. AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO

### 4.9.1. Amenaza

Conforme a lo estipulado en la Ley 1523 de 2012<sup>5</sup>, se define amenaza como “Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.”

Las amenazas se pueden clasificar de acuerdo a su origen en: a) Amenazas naturales, que son las provenientes de sucesos naturales, o eventos físicos originados por la naturaleza, y b) amenazas antrópicas, que son provocadas por la actividad humana.

<sup>5</sup> Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.

Las amenazas naturales reúnen todos los fenómenos atmosféricos, hidrológicos, geológicos e incendios que por su ubicación, severidad y frecuencia, tienen el potencial de afectar adversamente al ser humano, a sus estructuras y actividades (Chardon & González, 2002).

Figura 9. Efectos de las amenazas naturales



Fuente. [http://www.eird.org/cd/toolkit08/material/proteccion-infraestructura/gestion\\_de\\_riesgo\\_de\\_amenaza/8\\_gestion\\_de\\_riesgo.pdf](http://www.eird.org/cd/toolkit08/material/proteccion-infraestructura/gestion_de_riesgo_de_amenaza/8_gestion_de_riesgo.pdf)

#### 4.9.2. Vulnerabilidad

Conforme a lo estipulado en la Ley 1523 de 2012, se define vulnerabilidad como “Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos”

La vulnerabilidad corresponde a la probabilidad de que una comunidad, expuesta ante una amenaza tecnológica, natural o antrópica, según el grado de fragilidad de sus elementos, pueda sufrir daños humanos y materiales en el momento del impacto del fenómeno. La magnitud de los daños, se asocia con el grado de vulnerabilidad.

La vulnerabilidad se puede definir a través de factores físicos, naturales, ecológicos, tecnológicos, sociales, económicos, territoriales, culturales,



educativos, funcionales, político - institucionales y administrativos. Los factores político-institucional-administrativos, económicos, sociales y culturales están estrechamente vinculados: se condicionan unos a otros y con frecuencia se refuerzan entre sí (Chardon & González, 2002).

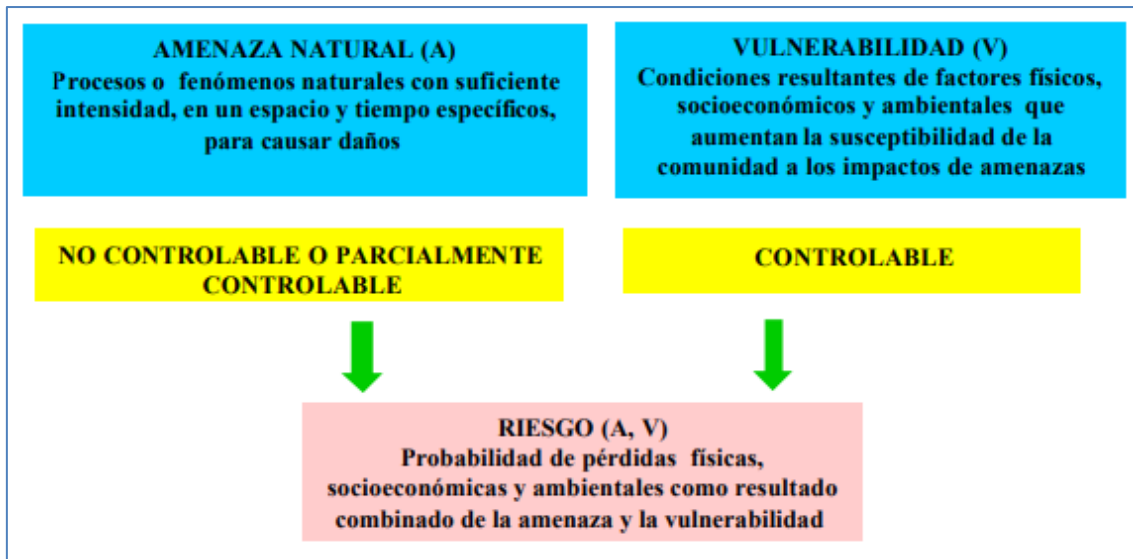
A continuación, se listan posibles factores de vulnerabilidad:

- *Factores físicos:* Ubicación.
- *Factores naturales:* Ecosistemas frágiles, tipo de suelo, erosión, fenómenos climatológicos globales.
- *Factores ecológicos:* Deterioro del ambiente.
- *Factores tecnológicos:* Tipo de vivienda, fallas técnicas en construcciones, calidad de infraestructuras, tratamiento y abastecimiento de agua.
- *Factores sociales:* Población, mortalidad infantil, segregación, marginalidad, malnutrición, densidad de población, incapacidad física, capacidad de recuperación.
- *Factores económicos:* Recursos, pobreza, PIB, estructura productiva, endeudamiento de los países.
- *Factores educativos:* tasa de alfabetismo, insuficiente fomento de cultura de la prevención, acceso a la información.
- *Factores político-institucionales y administrativos:* Patrón de desarrollo, gobernabilidad, inequidad, guerras, falta de voluntad política, no tener visión multi-amenaza.
- *Factores territoriales:* uso del suelo, urbanización rápida, hacinamiento de viviendas, falta de planeación.
- *Factores culturales:* Etnicidad, religión, ideología, hábitos tradicionales dañinos, manejo de basuras.

#### **4.9.3. Riesgo**

El riesgo es una función de la amenaza y la vulnerabilidad. Ambas son condiciones necesarias para determinarlo, mientras que los sucesos naturales no son siempre controlables, la vulnerabilidad sí lo es. Conforme a la Ley 1523 de 2012, el riesgo se define como “los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.”

Figura 10. Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo



Fuente. [http://www.eird.org/cd/toolkit08/material/proteccion-infraestructura/gestion\\_de\\_riesgo\\_de\\_amenaza/8\\_gestion\\_de\\_riesgo.pdf](http://www.eird.org/cd/toolkit08/material/proteccion-infraestructura/gestion_de_riesgo_de_amenaza/8_gestion_de_riesgo.pdf)

En términos generales, se puede considerar que el riesgo corresponde a un valor relativo probable de pérdidas de toda índole en un sitio específico vulnerable a una amenaza particular, en el momento del impacto de ésta y durante todo el período de recuperación y reconstrucción que le sigue. (Chardon & González, 2002)

#### 4.10. AMENAZAS COSTERAS

##### 4.10.1. Tsunamis

Un tsunami es una secuencia de olas que se generan por la perturbación del océano a causa de fenómenos como terremotos, deslizamientos de tierra o erupciones volcánicas. Los tsunamis pueden arribar a las costas con gran altura y provocar efectos destructivos. La mayoría de tsunamis se originan por sismos que ocurren en el contorno costero del Océano Pacífico, en las zonas de hundimiento de los bordes de las placas tectónicas que constituyen la corteza del fondo marino. (F. Farreras, Domínguez Mora, & Gutiérrez Martínez, 2005)

Los tsunamis pueden atravesar grandes distancias, en aquellos lugares donde el océano tiene profundidades de más de 6.000 m, las ondas pueden viajar a una velocidad de 800 Km/h, pueden trasladarse de un lado del Océano a otro del Pacífico en menos de un día. Los tsunamis viajan más lento en aguas costeras someras, pero su altura de onda puede aumentar drásticamente. (IDEAM, 2010)

Figura 11. Explicación de la formación de un Tsunami



Fuente. Servicio geológico de los Estados Unidos - USGS

En Colombia la zona más vulnerable a la ocurrencia de este fenómeno es el sur de la costa Pacífica; porque está sobre la zona de subducción de la placa de Cocos y porque es una parte relativamente baja en la que la plataforma continental se extiende hasta bien adentro del océano.

En Colombia, se tienen varios registros de la ocurrencia de este fenómeno. El 12 de diciembre de 1979, un Tsunami afectó a la población del municipio de Tumaco, Nariño, también se tiene conocimiento de eventos de esta magnitud en Tumaco en 1906, 1958 y 1979, en este último año, la ciudad no tuvo daños, debido a la presencia de la Isla El Guano, que mitigó y dispersó la mayor parte de la energía de las grandes olas. En la actualidad estas islas han desaparecido, aumentando el grado de exposición de la población ante un posible tsunami (IDEAM, 2010).

#### 4.10.2. Aumento crítico del nivel del mar por efectos meteorológicos

Las variaciones del nivel del mar que pueden tener lugar en un sitio determinado se asocian con las condiciones meteorológicas que pueden modificar la altura del mar positiva o negativamente. Normalmente, las fluctuaciones del viento a corto plazo, del orden de horas, no afectan la elevación del nivel del mar, pero si los vientos soplan en la misma dirección durante un día o más, pueden provocar cambios significativos. Estas variaciones pueden dar origen a inundaciones costeras, como en el caso de los huracanes, mar de leva, entre otros (IDEAM, 2010).

Los principales elementos que generan ascensos en el nivel del mar son la presión y el viento, cuyo efecto es más dañino en mares poco profundos y aguas someras<sup>6</sup>.

A continuación se definen diferentes fenómenos naturales que generan el aumento crítico del nivel del mar:

- **Mar de viento:**

Hace referencia al oleaje producido por la acción del viento que incide sobre la misma extensión marina en la cual sopla, ésta extensión marina recibe el nombre de "zona generadora". El aspecto del mar de viento se caracteriza por la presencia de olas agudas y de longitud de onda generalmente corta o moderada. La altura del oleaje es irregular. El viento que sopla contrario a la marea, causa un oleaje mayor (IDEAM,2010).

**Figura 12.** Oleaje de mar de viento



**Fuente.** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM

Para determinar la altura significativa del mar de viento se utiliza la Escala Douglas:

**Tabla 1.** Escala Douglas para caracterizar altura del mar de viento

<b>Grado</b>	<b>Nombre</b>	<b>Altura m.</b>
<b>0</b>	Calma	0
<b>1</b>	Rizada	0 a 1
<b>2</b>	Marejadilla	0.1 a 0.5
<b>3</b>	Marejada	0.5 a 1.25
<b>4</b>	Fuerte Marejada	1.25 a 2.5
<b>5</b>	Mar Gruesa	2.5 a 4
<b>6</b>	Mar muy Gruesa	4 a 6
<b>7</b>	Arbolada	6 <sup>a</sup> 9
<b>8</b>	Montañosa	9 a 14
<b>9</b>	Enorme	Más de 14

**Fuente.** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (Mayo de 2010). Amenazas costeras. Bogotá D.C., Colombia.

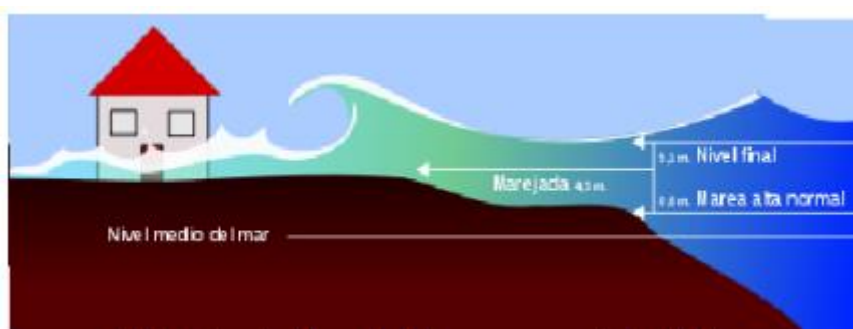
<sup>6</sup> Ver glosario

## - Marejadas

También conocida como surgencia de tormenta, se define como el aumento anormal del nivel del mar, originado por una tormenta intensa o un huracán, siendo la causa principal los vientos del huracán que empujan el agua sobre la costa (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica – IMN, s.f.).

La marejada ciclónica es producto de las olas impulsadas por el viento combinadas con un leve componente producto de la baja presión del centro del ciclón. Las olas producidas son relativamente bajas en altamar, pero su altura aumenta a medida que se aproximan al litoral.

**Figura 13.** Inundación por marejada ciclónica



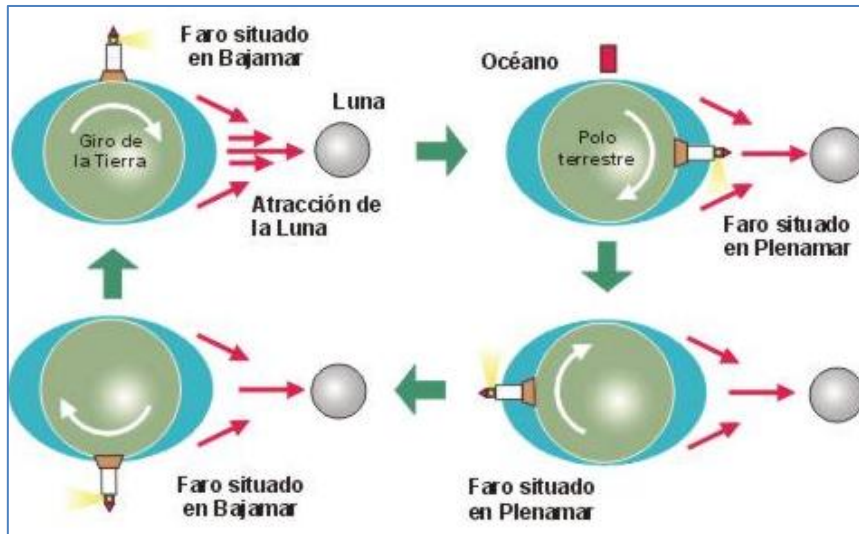
**Fuente.** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM

La marejada ciclónica se mide restando la elevación de la marea astronómica “normal” de la elevación total observada. Suele tener una duración de pocas horas. El área costera más peligrosa durante una marejada ciclónica, donde tiene el potencial de ser catastrófica, es a lo largo de costas con elevación baja, las cuales permiten que el agua penetre tierra adentro o a través de bahías, lagos y ríos (IDEAM, 2010).

## - Mareas

La marea hace referencia al ascenso y descenso periódico de todas las aguas oceánicas, incluyendo las de mar abierto, golfos y bahías, producido por las perturbaciones gravitatorias del Sol y la Luna en la Tierra. La fuerza gravitatoria provoca una oscilación rítmica y/o cíclica debida a la órbita de la tierra alrededor del Sol y de la Luna alrededor de la Tierra, lo que genera elevaciones máximas del agua del mar, denominadas pleamares y descensos de la misma denominados bajamares (IDEAM,2010). La frecuencia de la marea es aproximadamente de dos veces por día y su amplitud depende de la fase de la Luna, siendo máxima en luna llena y luna nueva. La amplitud de marea es la diferencia entre los niveles de pleamar y bajamar. (Real Sociedad Española de Física, s.f.)

Figura 14. Ciclo de la marea



Fuente. <http://www.aula2005.com>

El mayor riesgo de aumento crítico del nivel del mar, se presenta cuando se combina la marea alta, con la presencia de zonas de baja presión y vientos de gran intensidad.

#### - Fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación Sur)

El Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica define el ciclo ENOS como “un fenómeno natural que implica temperaturas oceánicas fluctuantes en el Pacífico ecuatorial”. El fenómeno El Niño es una de las fases extremas dentro del ciclo ENOS, y se refiere a la interacción climática océano-atmósfera a gran escala, asociada a un calentamiento periódico de las temperaturas de la superficie del mar. (IMN, s.f.), este calentamiento de la superficie del Océano Pacífico cubre grandes extensiones y por su magnitud afecta el clima en diferentes regiones del planeta, entre ellas, el norte de Sudamérica donde está situado el territorio colombiano. Como consecuencia de estas características cálidas oceánicas, se origina la formación de grandes masas nubosas y abundantes precipitaciones en la región. (IDEAM,2010)

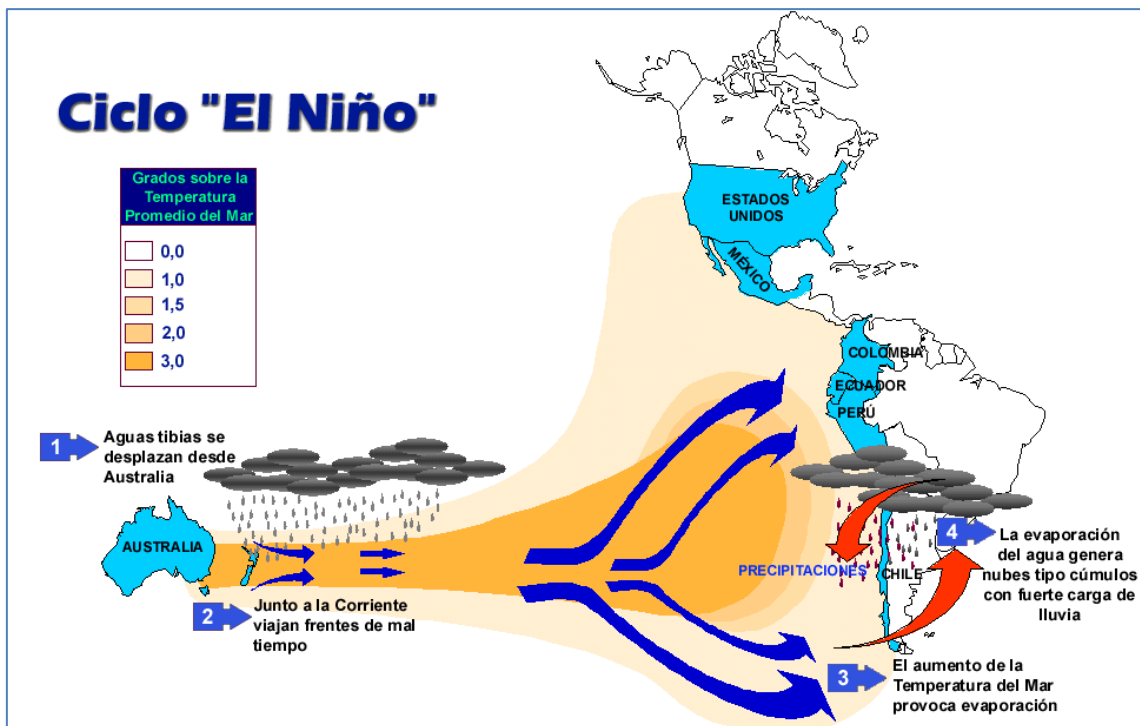
El fenómeno El Niño se puede describir en las siguientes fases (IDEAM, 2010):

- **Fase inicial:** Desplazamiento de aguas cálidas desde el sector occidental del Pacífico tropical hacia la zona cercana a la línea de cambio de fecha (los 180° de longitud). Los fuertes vientos que soplan hacia el occidente (los vientos alisios) comienzan a debilitarse, el nivel del mar en el Pacífico Occidental alcanza su máximo, y el nivel del mar a lo largo de la costa occidental de Sudamérica alcanza su mínimo para este ciclo. Con el debilitamiento de los vientos de superficie que soplan hacia el occidente, la surgencia ecuatorial costera comienza a reducirse y las

temperaturas de la superficie del mar en el Pacífico ecuatorial central y oriental comienzan a elevarse.

- Fase de desarrollo: Continúa el desplazamiento de las aguas cálidas hacia el Oriente a través del Pacífico tropical.
- Fase de madurez: Es posible encontrar el máximo calentamiento de la superficie del mar en el sector oriental del Pacífico tropical frente a las costas de Perú, Ecuador y Colombia.
- Fase de debilitamiento: Se presenta la disminución del calentamiento de las aguas del Pacífico tropical oriental hasta llegar a condiciones cercanas a las normales.

Figura 15. Ciclo El Niño



Fuente: <http://metnueve.blogspot.com.co>

Opuesto al término El Niño, el término "La Niña" se refiere al enfriamiento periódico de las temperaturas superficiales del mar, que se produce frecuentemente, pero de manera irregular, en el sector central y oriental del Pacífico tropical durante por lo menos seis meses. El afloramiento de aguas frías, a raíz de éste fenómeno, tiene importantes consecuencias en la atmósfera, uno de ellos es que, durante su aparición, el aire que está en contacto con el océano se enfría impidiendo la ocurrencia de lluvias (IMN, s.f.).

En Colombia los efectos del ciclo ENOS más destacados están relacionados con la alteración del patrón pluviométrico nacional, el cual se ve disminuido en gran parte de las regiones Caribe y Andina; los aumentos de la temperatura del

aire en los valles interandinos conocidos como ondas de calor; los aumentos del nivel y la temperatura superficial del mar en el Litoral Pacífico colombiano; el incremento de las heladas durante las temporadas secas en los altiplanos de Cundinamarca, Boyacá y Nariño; el aumento de las horas de Brillo Solar y de la Radiación durante dichas épocas y algunas otras alteraciones de carácter local (IDEAM, 2010).



## 4.11. MARCO GEOGRÁFICO

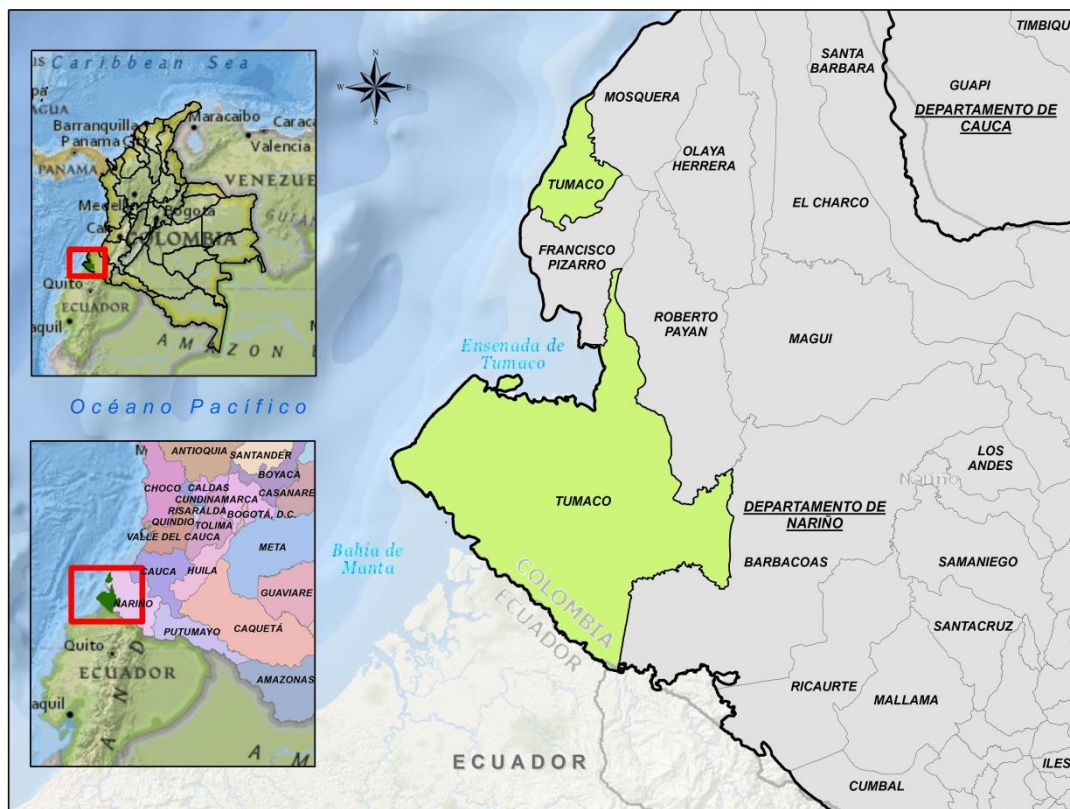
El desarrollo del modelo de inundación se realizará para el municipio de Tumaco. En este apartado se describen las principales características del municipio, concernientes al objeto del proyecto.

### 4.11.1. Localización geográfica

El municipio de Tumaco está localizado al sur occidente de Colombia, en el departamento de Nariño, presenta un área de 360.172,938 Ha. de extensión, con elevaciones que van desde los 0 m.s.n.m. hasta los 400 m.s.n.m (Alcaldía municipal de Tumaco, 2008). Los límites del municipio están constituidos de la siguiente forma:

- *Norte:* con los Municipios de Francisco Pizarro, Roberto Payán y Mosquera sobre la zona de San Juan de la Costa
- *Sur:* con la República de Ecuador
- *Occidente:* con el Océano Pacífico
- *Oriente:* con el Municipio de Barbacoas.

Figura 16. Localización del municipio de Tumaco



Fuente. Autoría propia

#### 4.11.2. Hitos históricos

En el municipio de Tumaco se registran algunos eventos históricos que han marcado el desarrollo de la región y otros que representan un antecedente de la vulnerabilidad del municipio ante la ocurrencia de fenómenos naturales (CCCP, 2003):

- 1640: Fundación de Tumaco por el jesuita Francisco Ruggi y llegada de los negros cimarrones y criollos provenientes de Esmeraldas, Ecuador.
- 1778: Terremoto en el Pacífico Sur colombiano.
- 1781: Insurrección de Tumaco, Independencia de Quito.
- 1855: Terremoto en el Pacífico Sur colombiano.
- 1868: Terremoto que afectó a Ecuador y Colombia.
- 1906: Terremoto y tsunami.
- 1917: Promulgación de la Ley 43 que incorpora a Tumaco los terrenos de bajamar.
- 1918: El municipio extiende sus dimensiones, se desarrolla en dos islas separadas por esteros de aguas y unidas por los puentes de El Comercio y La Paz.
- 1920-1930: Inicio de la construcción del ferrocarril que une a Tumaco con Pasto.
- 1928: Se desarrollan obras civiles de defensa natural contra tsunamis.
- 1947: Destrucción de la ciudad por un incendio.
- 1950: Inicio de la carretera Pasto-Tumaco. Se detiene la obra del ferrocarril.
- 1952: Segundo incendio que destruye la ciudad por completo.
- 1955 Tercer gran incendio devastador para una amplio sector habitado.
- 1979: Terremoto en el Pacífico Sur colombiano y tsunami. Destrucción de San Juan de la Costa.
- 1983: Marejadas en el Pacífico Sur colombiano a causa del Fenómeno de El Niño.
- 1986: Tumacazo: destrucción de predios y archivos institucionales.
- 1991: Epidemia de cólera en Tumaco.

#### 4.11.3. Aspecto sociocultural y económico

##### - Población

Según el DANE para el año 2005 la población total en el Municipio de Tumaco ascendía a 161.490 habitantes, distribuidos para la zona rural en 75.605 habitantes y para la zona urbana 85.885 habitantes. Conforme a la proyección de población municipal por área 2005.2020, realizada por el DANE, el municipio de Tumaco tiene una población de 208.318 habitantes al año 2017, de los cuales 117.529 hab. Se encuentran en la zona urbana.

La totalidad de la bahía de Tumaco está habitada por comunidades negras, en su mayoría, e indígenas, en menor proporción. De acuerdo al censo 2005

realizado por el DANE, el 88.8 % de la población se auto reconoce como negro, mulato, afrocolombiano o afrodescendiente, mientras que un 5.1% corresponde a población indígena, el resto de la población no se reconoce en algún grupo étnico. De acuerdo al POT 2008-2019, en municipio de Tumaco cuenta con 14 Consejos Comunitarios de Comunidades Negras.

La vivienda tradicional de las comunidades negras de los caseríos en la bahía de Tumaco, corresponde a palafitas<sup>7</sup>. Las viviendas ubicadas fuera del casco urbano no cuentan con servicios públicos, lo cual genera ambientes propicios para la proliferación de enfermedades y disminución de las condiciones de calidad de vida (CCCP, 2003).

#### - **Desarrollo económico**

“La economía del municipio de Tumaco se fundamenta en el sector primario, con la explotación forestal, pesquera, agrícola y ganadera; así como del sector de la agroindustria y el sector de servicios” (Alcaldía Municipal de Tumaco, 2008), el municipio es el polo de desarrollo de la subregión.

Las fuentes de empleo en Tumaco son pocas, y se concentran en entidades públicas, entidades de servicios y comercio, turismo, agroindustria y pesqueras. Según el diagnóstico regional realizado por la Cámara de Comercio de Tumaco (Cámara de Comercio de Tumaco, 2015), la ocupación con mayor porcentaje de participación corresponde a la categoría de obrero o empleado (69%), lo cual evidencia la alta dependencia económica e la población a un grupo reducido de empleadores (5%). Mientras que los trabajadores independientes representan el 18% de la población, muchos de los cuales se encuentran en situación de informalidad.

#### - **Uso del suelo**

Conforme a la información del Plan de Ordenamiento Territorial 2008-2019, en el municipio de Tumaco, se presentan los siguientes usos del suelo:

- Uso de Protección: “se presenta en zona de litoral, donde se localiza la vegetación de Manglar y se complementa con uso de extracción y recolección artesanal. La zona destinada para protección es de 50.788,08 Hectáreas, con un área específica destinada para la extracción y recolección de 23.514,55 has.”
- Uso Forestal: “Se desarrolla sobre todo en las formaciones de guandal, en un áreas de 92.239,824 has. presentándose también un área de para la extracción y recolección artesanal”.
- Uso Agropecuario: Cobertura vegetal relacionada con la intervención antrópica de los suelos. Se encuentran 156.091,056 has. de suelos en

---

<sup>7</sup> Ver glosario.

este uso y está representado por especies vegetales de palmáceas, frutales y agrícolas.

#### - **Uso de bienes de uso público en zona costera**

Según el Centro Control Contaminación del Pacífico, los bienes de uso público en la zona costera de la bahía de Tumaco<sup>8</sup>, están constituidos por aguas marítimas, terrenos de bajamar y playas. “Entre los usos dados a estos espacios, resaltan las actividades pesqueras y portuarias, la navegación en aguas interiores, la camaronicultura, el desarrollo de numerosos asentamientos humanos con construcciones palafíticas en terrenos de bajamar, y la construcción de hoteles y espacios dedicados a la explotación turística en las playas”(CCCP,2003)

Las construcciones que se encuentran sobre las zonas anteriormente mencionadas presentan un alto riesgo, ya que deben soportar el efecto del oleaje y las corrientes, los cambios producidos por procesos de erosión y sedimentación y los efectos causados por elevaciones en el nivel del mar (CCCP,2003). Sucesos a los que la bahía de Tumaco está expuesta.

El uso que representa un mayor conflicto es el de las viviendas palafíticas, que corresponden a una invasión del espacio público, y que por su constitución, son altamente susceptibles a inundaciones y eventos de licuación<sup>9</sup>. Además estas viviendas no tienen las condiciones para realizar obras de infraestructura de servicios públicos ni de recolección de basuras, de tal forma que gran parte de los desechos sólidos tienen como destino final el mar y la playa, generando contaminación del agua y del suelo sobre el cual se establecen.

#### **4.11.4. Aspectos físicos**

##### - **Climatología**

El clima del Municipio de Tumaco corresponde a un clima Tropical Húmedo con altos niveles de precipitación, temperatura y humedad relativa. El clima en se ve influenciado localmente por la cercanía a las masas oceánicas, el ascenso de masas de aire cargados de humedad desde el Océano Pacífico colisionando sobre el flanco de la Cordillera Occidental y eventos climáticos como el Fenómeno de El NIÑO (Alcaldía Municipal de Tumaco, 2008).

El municipio tiene una temperatura promedio de 26,2°C y una precipitación promedio de 2.843 mm/año, presentando las precipitaciones más altas en los meses de abril, mayo y enero; y las más bajas en febrero, octubre y noviembre.

---

<sup>8</sup> Estos espacios están bajo la jurisdicción de manejo de la Dirección General Marítima y se refiere a las áreas que se encuentran localizadas a partir de la línea de la más baja marea ó zonas de bajamar, consideradas como espacio público cuya propiedad es inembargable, imprescriptible, inajenable, inalienable y se aplica su legitimidad de acuerdo a la Ley 2324 de 1984. (POT TUMACO 2008-2015)

<sup>9</sup> Ver glosario.

## - Hidrografía

El Municipio de Tumaco se caracteriza por la presencia de ríos caudalosos, con afluencia de un gran número de quebradas y esteros. Su conformación característica obedece a que nacen en la cordillera de los andes, recorriendo tramos cortos a través de terrenos pendientes para llegar a la costa y desembocar al mar, donde forman zonas inundables en amplios deltas con presencia de los mangles y enormes esteros, facilitando la comunicación y una gran abundancia de especies marinas (Alcaldía Municipal de Tumaco, 2008).

### 4.11.5. Amenazas naturales

Conforme a la información consignada en el Plan de Ordenamiento Territorial 2008-2019 de Tumaco, con base en estudios realizados por INGEOMINAS, el OSSO, la Universidad del Valle y la Universidad del Cauca y CORPONARIÑO, el municipio presenta las siguientes amenazas:

- Amenaza sísmica
- Amenaza por maremoto (Tsunami)
- Amenaza por Licuación
- Amenaza por maremoto
- Amenazas de origen hidrogeológico
- Erosión
- Inundaciones lentas en llanura o costa marítima
- Marejadas
- Inundaciones súbitas

### 4.12. ANTECEDENTES

- **Nombre del Artículo:** Lidar y fotografía aérea digital en la determinación del impacto del aumento en el nivel medio del mar en el sector de “La Boquilla”, Cartagena de Indias; Caribe Colombiano.
- **Autor:** Boletín Científico CIOH No. 24 - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas
- **Fecha de Publicación:** Agosto 15 2007
- **Síntesis de la situación problemática planteada**

Debido al riesgo en que se encuentran los habitantes de las zonas costeras colombianas ante una amenaza de ascenso del nivel medio del mar y a la ausencia de Modelos Digitales del Terreno (DTM's) con exactitud horizontal y vertical centimétrica, se establecieron espacialmente las zonas del litoral Caribe colombiano que se inundarán en el sector de la Boquilla, así como también se evaluaron los efectos de esta inundación sobre la población y sus viviendas, a través de la utilización de las tecnologías del sensor LIDAR (Light Detection

and Ranging), cámara métrica digital y del SIG ArcGis 9.0. En términos de alcance y relevancia, los resultados de la investigación proporcionan un elemento de soporte técnico para la toma de decisiones relacionadas con el control y administración de los litorales por parte de la Autoridad Marítima Nacional (DIMAR) y de sus Capitanías de Puerto. El desarrollo de la investigación incluyó la toma de fotografías aéreas digitales simultáneamente con la operación del sensor LIDAR, la posterior ortorectificación digital del material aerofotográfico y el filtrado de la información tridimensional obtenida con el sensor LIDAR durante su operación en Diciembre de 2005; así como también la adopción de escenarios de inundación, la utilización de las funciones del SIG ArcGis 9.0 para la generación de los DTM's; la recopilación de información sobre cantidad de población y sus viviendas; la determinación del riesgo y finalmente, la evaluación de la cantidad de población afectada. Los resultados de la investigación además, de la utilidad para la Autoridad Marítima Nacional, proporcionan información adecuada para el conocimiento, análisis y gestión del riesgo debido al ascenso del nivel medio del mar en el litoral Caribe colombiano, por parte de autoridades nacionales, regionales y locales, encargadas de formular y poner en marcha, las políticas de desarrollo social y económico del país.

#### **- Metodología utilizada para el desarrollo del trabajo**

La metodología se desarrolló en 6 pasos:

- a) Alistamiento de los sensores, diseño del vuelo y toma de datos
- b) Procesamiento de la información LIDAR y generación de ortofotografías
- c) Determinación del aumento en el nivel medio del mar para el Caribe colombiano
- d) Estimación de la extensión de la inundación y determinación de la gravedad de las consecuencias de la amenaza
- e) Determinación del índice de vulnerabilidad
- f) Determinación del riesgo.

#### **- Resultados y conclusiones más importantes**

Las áreas inundadas para los dos escenarios considerados en la presente investigación se ilustran en las figuras 5 y 6 respectivamente. Dentro de la determinación de la gravedad de las consecuencias de la inundación, en el área de trabajo se consideró una población total de 9661 habitantes, de conformidad con los datos suministrados por la Oficina de Planeación Municipal de Cartagena con base en el censo del SISBEN del año 2005. La cantidad total de unidades de construcción presentes en la zona de estudio de acuerdo con las aerofotografías de 2005, correspondió a 2314.

Como era de esperarse, en los dos escenarios se inundan las zonas más bajas (sectores aledaños a la Boca que comunica la Ciénaga de la Virgen con el Mar Caribe y los sectores aledaños a la Ciénaga de Juan Polo) y se salvaguardan, aquellas que corresponden a las zonas más altas del sector; normalmente los

sectores que han sido objeto de alta intervención antrópica en términos de rellenos sobre bienes de uso público (playas y terrenos de bajamar).

Uno de los principales inconvenientes en los estudios de ascenso del nivel del mar, radica en la limitada cantidad de datos actualizados de las zonas costeras, más aún si se tiene en cuenta lo dinámico de estos ambientes. Sumado a lo anterior se encuentra la baja resolución de los datos del terreno, especialmente en las alturas, lo que no permite efectuar cálculos de inundación de forma confiable. Sin embargo, la presente investigación, conforma una evaluación a escala local (área de trabajo) de forma detallada al incluir, por una parte, la información pictórica de la fotografía aérea digital con una resolución espacial de 25 cm y por otra, la información altimétrica proveniente del sensor LIDAR con exactitud vertical centimétrica. (Afanador Franco, Torres Parra, Gómez López, & Gutiérrez Briceño, 2006)

- **Nombre del Artículo:** Estimación De La Amenaza Por Inundación Generada por Ondas de Tsunami Considerando la Altura y Velocidad de la Lámina de Agua Inundante para el Municipio de Tumaco

- **Autor:** Boletín Científico elaborado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico CCCP.

- **Fecha de Publicación** Diciembre 2007

- **Objetivos de la investigación**

1. La estimación de la amenaza producida por ondas de tsunami generadas por sismos cercanos a la costa.
2. Determinar la interacción durante la inundación de la altura de lámina de agua inundante y la velocidad de tránsito de la misma en la zona costera.
3. Disponer mapas de inundación con atributos no sólo de seco-mojado, sino también del daño potencial a la zona costera.

- **Síntesis de la situación problemática planteada**

Este documento presenta la evaluación de la amenaza de origen natural, generada por el arribo de ondas de tsunami al borde costero del casco urbano del municipio de Tumaco, localizado en el departamento de Nariño, producidas por eventos sísmicos cercanos a la costa generados en la zona de subducción entre las placas de Nazca y Suramericana, y la falla de Panamá. La amenaza se determinó a partir de la consideración conjunta de la altura y velocidad de la lámina de agua inundante, siguiendo una metodología desarrollada por la Universidad Nacional de Colombia en 2003, la cual cualifica la zona inundada no sólo con atributo de seco-mojado, sino también con el potencial daño ocasionado sobre la zona durante el tránsito de la inundación. Tener un conocimiento detallado del elemento que resulta amenazante para una población, se convierte en su principal instrumento de defensa, ya que de esta forma se dispone de información valiosa para la adecuada gestión del territorio por parte de las entidades competentes con jurisdicción en la zona, además de

funcionar como una herramienta para los entes operativos encargados de la prevención y atención de desastres.

#### - Metodología utilizada para el desarrollo del trabajo

La metodología seguida incluyó cinco pasos:

- a) Definición del sismo generador del tsunami;
- b) Definición de la deformación del lecho marino y de la superficie libre del mar;
- c) Tránsito de las ondas de tsunami;
- d) Estimación de la magnitud de la inundación (altura y velocidad) y,
- e) Utilización de los resultados para la generación de mapas de amenaza.

#### - Resultados y conclusiones más importantes

A partir de los resultados de los diferentes escenarios de inundación, las condiciones más desfavorables del grupo evaluado son las del sismo con epicentro en la posición 3, ubicada a 128km de la bahía de Tumaco y con mecanismo de falla superficial normal, sus ondas de tsunami fueron las de mayor magnitud y el tiempo de arribo cercano a 40 minutos.

Para todos los casos, las áreas no inundadas son mayores cuando los arribos de ondas de tsunami coinciden con estado de marea media, y éstas disminuyen cuando aumenta la magnitud del sismo generador. Los sitios que experimentan mayor altura de onda son Vaquería, islote localizado hacia la izquierda de la isla de Tumaco; la isla de El Morro, en las playas del Batallón Fluvial de Infantería de Marina, y la playa turística. La isla de Vaquería funciona como barrera natural para la isla de Tumaco (área completamente poblada), ya que ella soporta el impacto inicial de las ondas de tsunami y en ella se disipa gran parte de la energía, lo que se traduce en una reducción de hasta el 50% en las alturas máximas de ola incidente en la costa de la isla de Tumaco; mientras en Vaquería se alcanzan alturas de onda de hasta 4.5m, en la isla de Tumaco no se exceden los 2m, para el evento contemplado más desfavorable, Mw 8.0 en marea alta. Su actual funcionalidad se asemeja a la atribuida a la isla del Guano durante la ocurrencia de los tsunamis de 1906 y 1979 en esta región.

El escenario de inundación en todos los casos modelados y seleccionado para la evaluación de la amenaza por tsunami es el producido por un sismo en la posición (2.77 °N, 79.76 °O), con una magnitud de Mw 8.0 y arribo de las ondas de tsunami a la costa con coincidencia de nivel alto de la marea. Las alturas máximas registradas son cercanas a 4.75m y en promedio la zona inundada soporta 2m de altura de lámina de agua, el único sector que no sufre inundación es el sector conocido como El Morro, este escenario es completamente desastroso. La evaluación de la amenaza indica que toda el área inundada presenta condiciones suficientes para producir pérdidas de vidas, por lo tanto las medidas de protección implementarse deben ser sólidas y que realmente ofrezcan protección. • La isla de Vaquería funciona como



barrera natural de protección para la isla de Tumaco, ya que ella soporta el impacto inicial de las olas de tsunami y disipa gran parte de la energía, lo que se traduce en una reducción de hasta el 50% en las alturas máximas de ola incidente en la costa. Su actual funcionalidad se asemeja a la atribuida a la isla del Guano durante la ocurrencia de los tsunamis de 1906 y 1979. ( Cardona Orozco, Toro, Vélez, & Otero Díaz, 2007)

- **Nombre del Artículo:** Variabilidad del nivel del mar desde 1950 hasta el 2000 y riesgos asociados a episodios de mar de leva en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande, Cartagena de Indias, Colombia.
- **Autor:** Boletín Científico Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe CIOH No. 26, ISSN 0120-0542, 72-85 (2008)
- **Fecha de Publicación** Septiembre 26 2008
- **Objetivos de la investigación**

1. Encontrar los fenómenos que producen elevación del nivel del mar debidos al viento y el oleaje.
2. Estudiar las causas que originan los fenómenos de Mar de Leva en la ciudad de Cartagena
3. Evaluar el impacto del fenómeno de Mar de Leva en la costa colombiana, estimando el riesgo de inundación en el sector de Bocagrande y Castillogrande.

- **Síntesis de la situación problemática planteada**

Se estudió el riesgo de inundación en Bocagrande y Castillogrande, dos penínsulas de la ciudad colombiana de Cartagena de Indias en la cuenca suroeste del mar Caribe, en varias etapas. Se analizó la serie de tiempo del nivel del mar registrado por un mareógrafo en la Bahía de Cartagena calculando la marea meteorológica a partir de la diferencia entre los niveles del mar observados y la marea astronómica. Estos residuos fueron analizados en busca de correlaciones con datos meteorológicos locales, regionales y a escala de toda la cuenca del mar Caribe. Este análisis permitió caracterizar el aumento en el nivel del mar causado por tormentas (ANMCT) en esta parte del litoral colombiano, lo que permitió entender los fenómenos de inundaciones que ocurrieron entre 1950 y el 2000, causados por los llamados localmente “mares de leva”. Estos eventos recurrentes, producidos por la combinación de fenómenos de 'set-up' causados por el viento y el oleaje, y de 'run-up' por las olas, provocan inundaciones de amplitudes variables en algunas calles en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande. Un Modelo de Terreno Digital de alta precisión construido con base en datos de LIDAR (con precisión de +/- 20 cm) sirvió de base topográfica para la elaboración de escenarios relacionados con el ANMCT y del aumento local del nivel medio del mar para el siglo XXI. Estos escenarios mostraron la extrema vulnerabilidad de Cartagena, particularmente en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande y la necesidad de intervención en el corto plazo teniendo en cuenta las

características geomorfológicas de la ciudad y dada su importancia social y económica para Colombia.

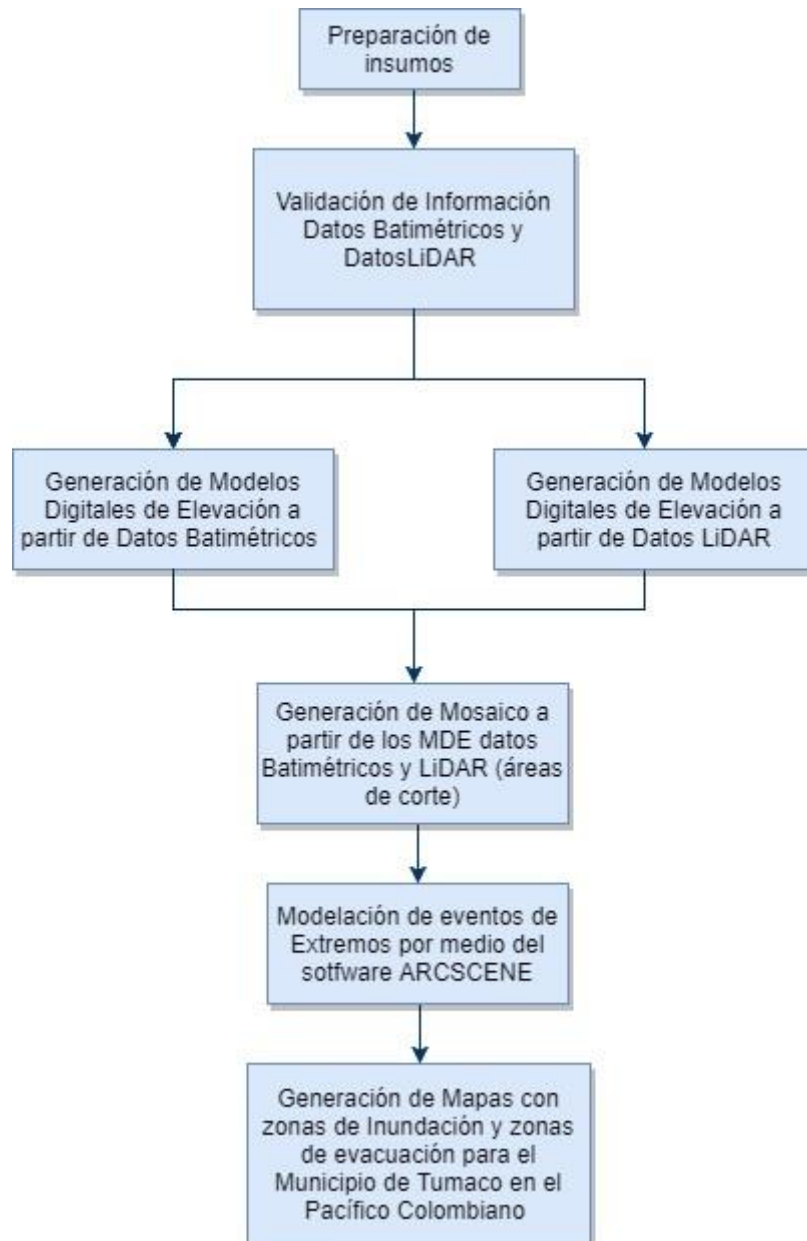
**- Resultados y conclusiones más importantes**

Los escenarios que ilustran inundaciones marinas de media o extrema importancia, evidencian una muy importante vulnerabilidad del sector a los riesgos marinos, dada la debilidad de su altimetría (poca altura). En efecto, la elevación del plano de agua, aunque tenga consecuencias importantes (en el último escenario la totalidad de las calles del barrio quedan inundadas), es limitada. Así, una elevación de 1.26 m (escenario al 2100 para un mar de leva de 1 m) es un valor relativamente bajo que puede presentarse varias veces por siglo. En ese sentido se pueden imaginar mayores niveles en el caso en que un huracán afectara directamente Cartagena.

Interesarse por el riesgo de inundación en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande tanto a escala local como global nos ha permitido poner en evidencia dos orígenes. Las inundaciones pueden proceder de aumentos del nivel del mar generados por las condiciones atmosféricas locales añadidas a las variaciones del caudal del canal del Dique y a las lluvias locales, o ser causados por factores meteorológicos de más pequeña escala. Durante la época seca frentes fríos penetran en la cuenca caribeña con una dirección Sur Sureste y generan oleaje de tamaño muy importante. Cuando este oleaje se presenta, la fisonomía y la orientación de la costa son los principales factores de vulnerabilidad. La orientación de las olas provocadas por la progresión de los frentes es perpendicular a la costa, lo que produce un 'set-up' importante y permite por medio del 'run-up' que las olas se estrellen hasta en las calles de frente al mar. (Nicolae Lerma, François Thoma, Durand, Torres, & Andrade, 2008)

## 5. METODOLOGÍA

Figura 17. Metodología del proyecto



Fuente. Autoría propia

## 5.1. PROCEDIMIENTO

### 5.1.1. Fase 1. Preparación de insumos.

- **Actividad 1.** Solicitud de datos Batimétricos entregados por la dirección General Marítima, en formato txt.
- **Actividad 2.** Solicitud de datos LiDAR entregados por la dirección General Marítima, en formato LAS.
- **Actividad 3.** Solicitud de mosaico año 2010 del municipio de Tumaco, a la dirección General Marítima.
- **Actividad 4.** Acondicionamiento con el software Global Mapper Versión 18.1
- **Actividad 5.** Acondicionamiento con el software ArcMap 10.5 – ArcScene 10.5 de ESRI.

### 5.1.2. Fase 2. Validación de la información

- **Actividad 1.** Validación de datos batimétricos

Los datos batimétricos fueron proporcionados por la Dirección General Marítima DIMAR, en formato .txt, en el que está consignado el identificador del punto, sus coordenadas (x, y) y la profundidad. Para su validación, estos datos se pasan a formato shapefile y se grafican para comprobar su profundidad.

Teniendo en cuenta que los datos LiDAR tienen el elipsoide como superficie de referencia, se debe garantizar que los datos Batimétricos estén en el mismo sistema; para ello, a los datos de profundidad se les suma el valor medio del mar según la ondulación del modelo GEOCOL 2004<sup>10</sup> para el Municipio de Tumaco, el cual es de 14,42 metros según estudios realizados por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico - CCCP, que “Partiendo de la necesidad actual de implementar una cota elipsoidal para el cero histórico, que sea compatible en trabajos donde intervienen datos espaciales provenientes de alturas elipsoidales en tierra, se genera una grilla de altura elipsoidal en el área general de estudio (Bahías de Buenaventura y Málaga), construida en base al modelo GEOCOL 2004, el cual es utilizado como referencia de nivel medio del mar para Colombia en asignación de cotas ortométricas al asociarlo con alturas elipsoidales”(CCCP,2014).

---

<sup>10</sup> Ver Modelo geoidal.

**Tabla 2.** Altura Elipsoidal de Cerro Histórico (MLWS) Basado en Modelo GEOCOL 2004 en metros.

ESTACIÓN	ONDULACIÓN MODELO GEOCOL 2004	AMPLITUD DE LA MAREA	CERO HISTÓRICO ALTURA ELIPSOIDAL
SEMAP	17.48	-2.54	14.94
JUANCHACO	14.39	-2.145	12.245
TUMACO	14.42	-2.025	12.68

**Fuente.** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico - CCCP. (2014). *Evaluación de la amenaza por tsunami de origen cercano I que se encuentran expuestos los municipios de Tumaco y Buenaventura.* San Andrés de Tumaco.

- **Actividad 2.** Validación de datos LiDAR

La validación de datos LiDAR se realiza por medio de un control de calidad que se aborda desde la revisión de tres puntos:

Exactitud de clasificación: Describe el grado de fidelidad de los valores de los atributos asignados a los elementos en la base de datos con respecto a su verdadera característica en el mundo real, y la clasificación correcta de los objetos y sus relaciones de acuerdo con las especificaciones de producto.

Para este proceso se realiza una verificación de la base cartográfica para establecer la correcta clasificación de los objetos conforme a la realidad. En esta verificación se consideran las imágenes fuente.

Exactitud Posicional: Describe la cercanía en posición de los objetos en el conjunto de datos con respecto a sus posiciones verdaderas (o las asumidas como verdaderas). La evaluación de la exactitud posicional se realiza conforme a la NTC 5205<sup>11</sup>, en la que se establece un criterio de aceptación del 95% del nivel de confianza. Para lograrlo se hace necesario tener 20 puntos distribuidos de tal manera que reflejen el área geográfica de interés así como la distribución del error de los datos. Cuando se prueban estos puntos, el nivel de confianza permite que un punto caiga dentro del umbral señalado por las especificaciones del producto. Si no es posible identificar 20 puntos para la prueba, deben identificarse otros métodos estadísticos.

Exactitud en la temporalidad: Se realiza evaluando la veracidad de las referencias espaciales de los empalmes entre líneas de vuelo del mismo proyecto y entre otros proyectos con los que ya se cuenta.

### 5.1.3. Fase 3. Generación de modelo digital a partir de datos Batimétricos

---

<sup>11</sup> Norma Técnica Colombiana que define una metodología estadística para estimar la precisión de las posiciones de puntos sobre los mapas y los datos digitales geoespaciales con respecto a puntos terrestres de referencia con mayor precisión. (Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital, s.f.)

- **Actividad 1.** Elección de método de interpolación.

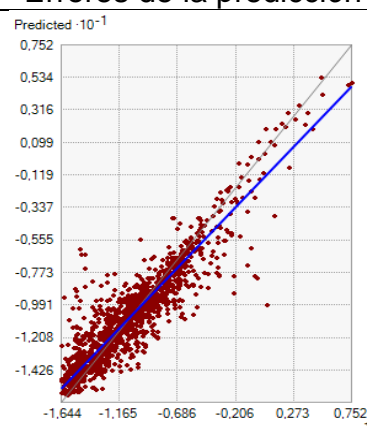
La interpolación de datos ofrece la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos discretos. Para la generación del Modelo Digital de Elevación a partir de los datos Batimétricos de la zona de estudio, se usó el software ArcGis Versión 10.5.

Para elegir el mejor método de interpolación, se probaron diferentes métodos estadísticos y determinísticos, por ser los más utilizados en los estudios de análisis de la variación espacial en la interpolación de datos, y se realizó un análisis exploratorio de datos con los siguientes métodos:

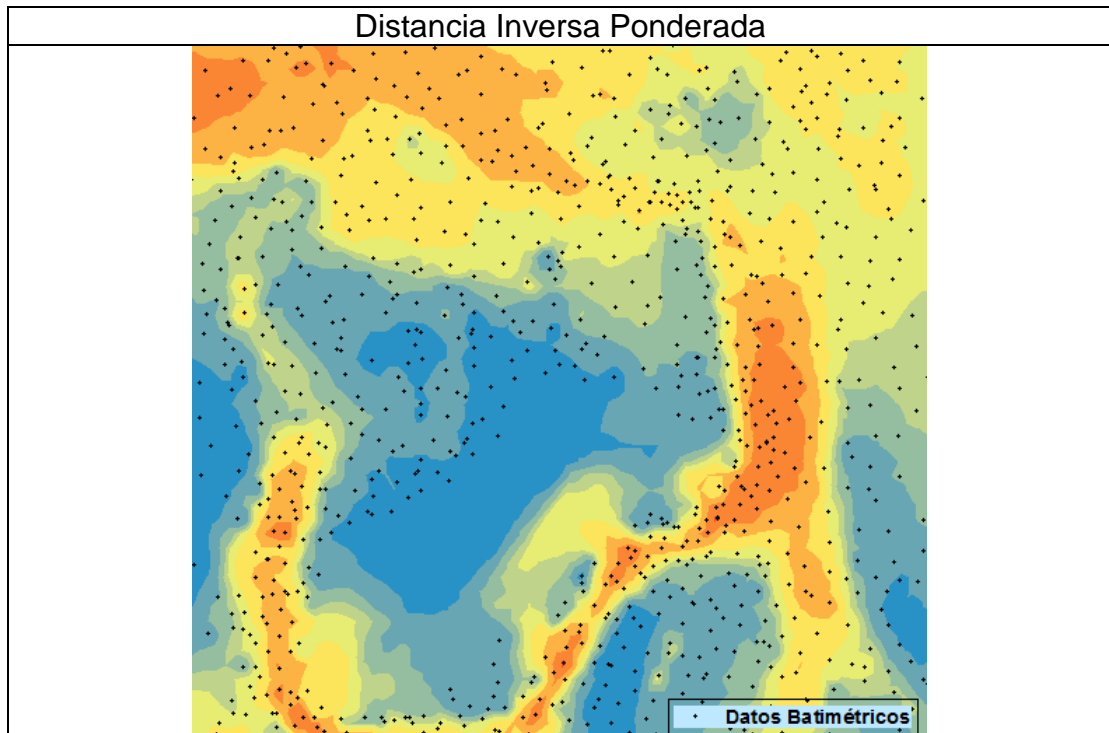
- **Métodos Determinísticos**

**Tabla 3.** Resultados Método Distancia Inversa Ponderada

Distancia Inversa Ponderada				
Predicción de valores				Errores de la predicción
Source ID	Included	Measured	Predicted	Error
0	Yes	-14.16	-12.26...	1.8994145372787425
1	Yes	-10.24	-12.97...	-2.7337187933287304
2	Yes	-7.74	-9.805...	-2.0654152698297494
3	Yes	-5.32	-10.04...	-4.7267399897168865
4	Yes	-6.71	-10.06...	-3.3507704629922666
5	Yes	-9.82	-10.55...	-0.7383074980272912
6	Yes	-14.92	-14.34...	0.5730701868871737
7	Yes	-13.51	-13.40...	0.10798952828506891
8	Yes	-8.4	-10.24...	-1.8431235827039707
9	Yes	-12.63	-13.70...	-1.0750746919516896
10	Yes	-13.9	-12.79...	1.1086087097527368
11	Yes	-8.96	-9.709...	-0.7492899477874477
12	Yes	-11.67	-12.37...	-0.7084266162914243
13	Yes	-11.42	-9.126...	2.293227668520922
14	Yes	-14.76	-12.52...	2.232163569347682
15	Yes	-11.28	-9.553...	1.7268242763734918
16	Yes	-6.15	-6.294...	-0.14475459662761292
17	Yes	-9.82	-10.05...	-0.2310422726176089
18	Yes	-8.52	-10.39...	-1.8743985716285927
19	Yes	-6.56	-10.71...	-4.15431529686741
20	Yes	-10.12	-14.05...	-3.934034082420782

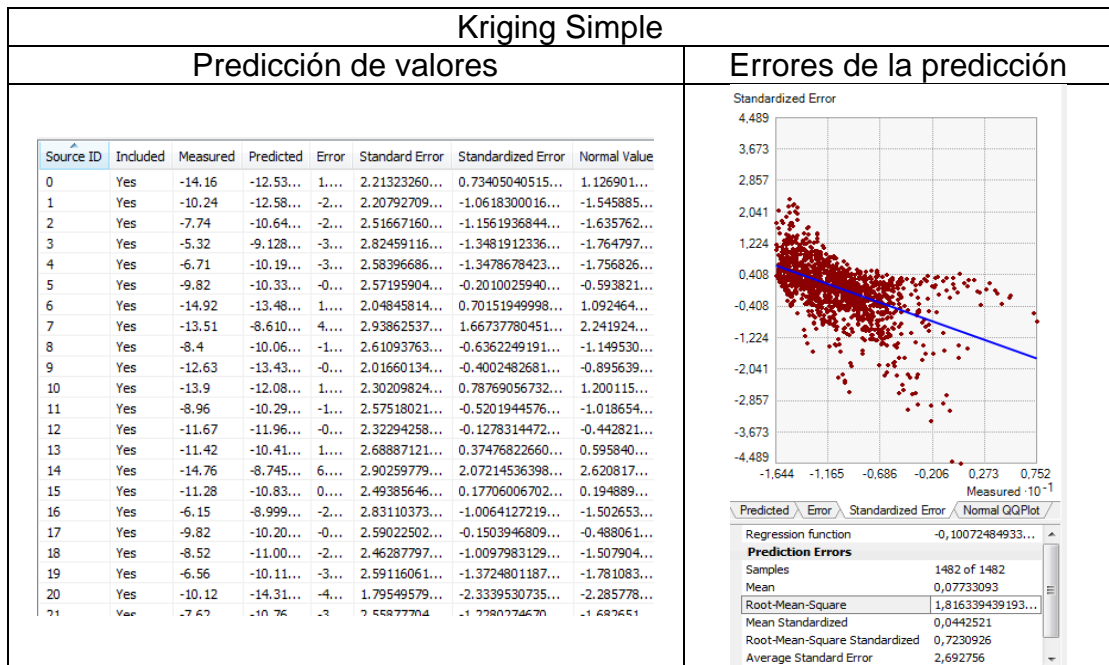


Predicted	Error
Regression function	0,845761003295036 * x + ...
<b>Prediction Errors</b>	
Samples	1482 of 1482
Mean	0,04517052
Root-Mean-Square	1,5126995865446586
Export Result Table	



- **Métodos Estadísticos**

Tabla 4. Resultados Método Kriging Simple



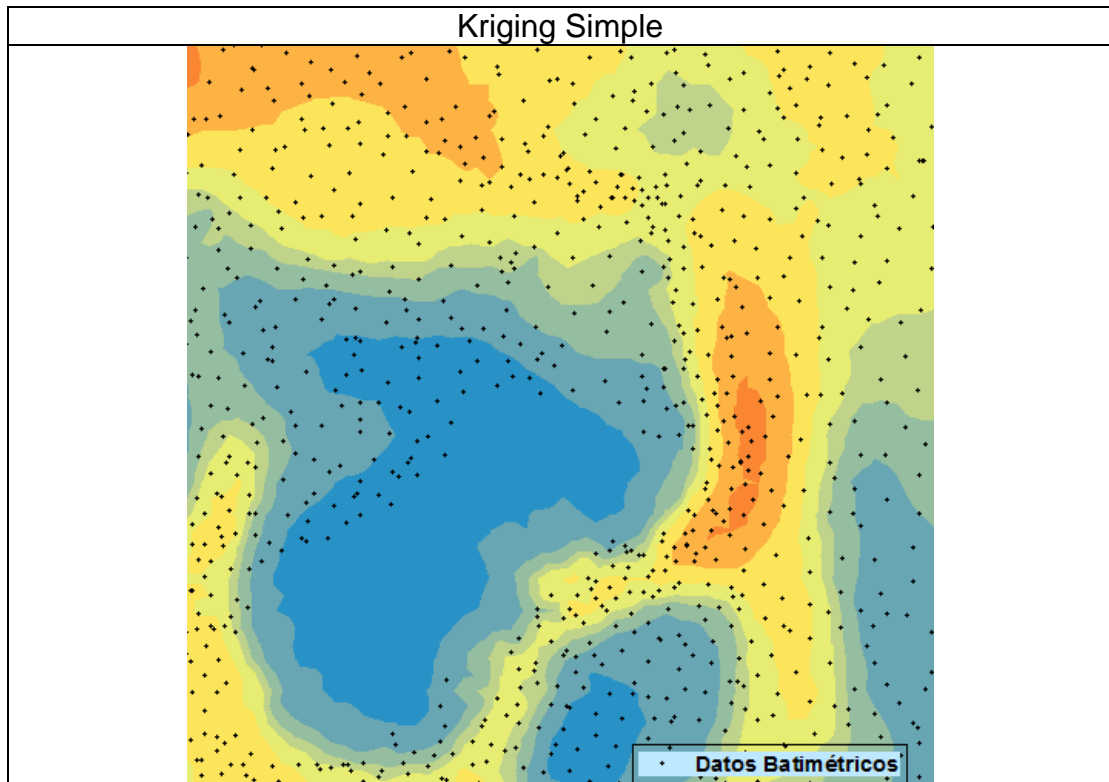
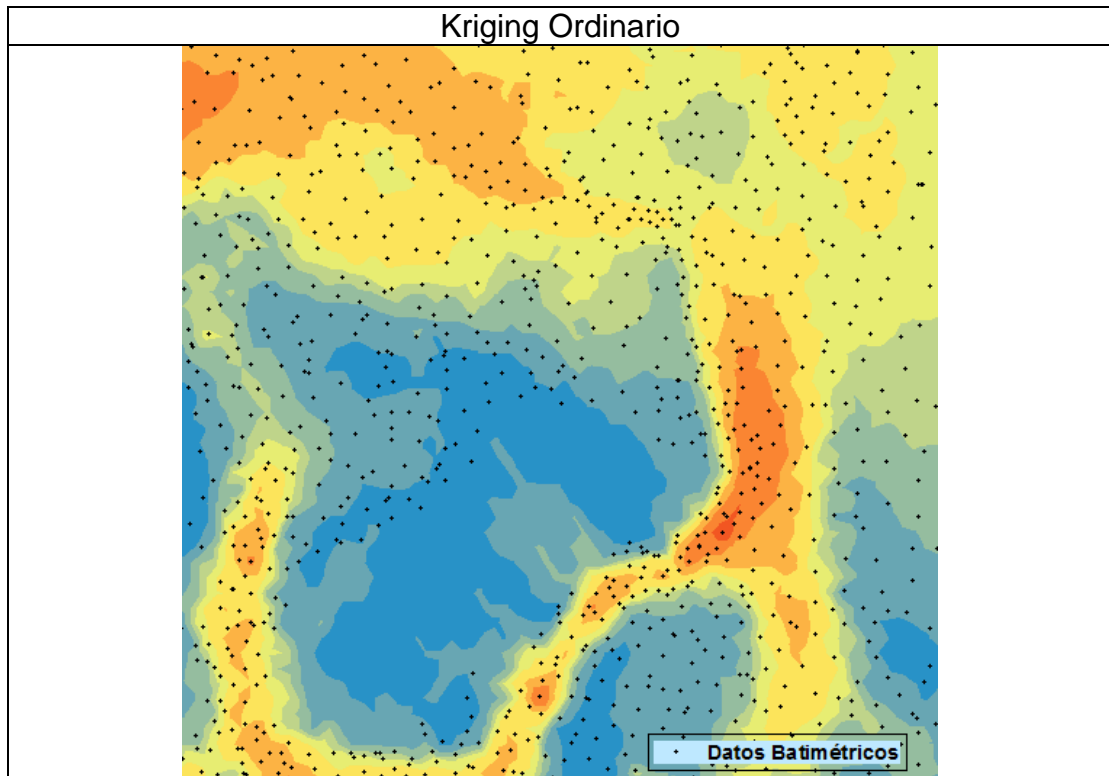


Tabla 5. Resultados Kriging Ordinario

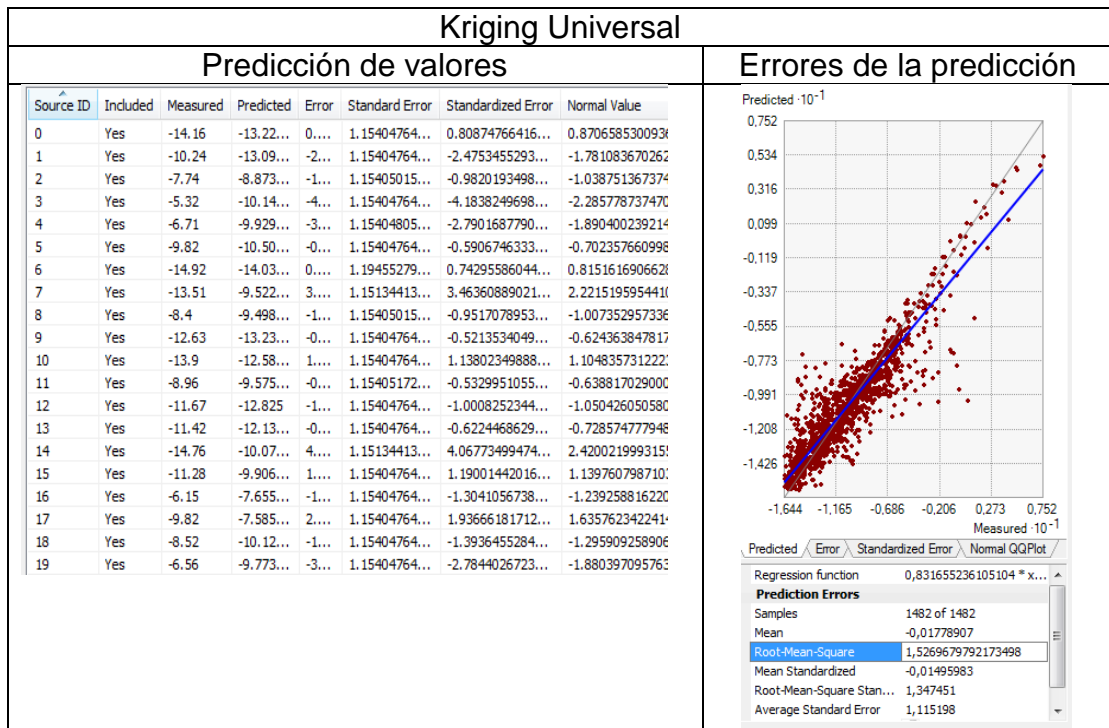
Kriging Ordinario							
Predicción de valores				Errores de la predicción			
Source ID	Included	Measured	Predicted	Error	Standard Error	Standardized Error	Normal Value
0	Yes	-14.16	-13.22...	0.94...	1.15404764...	0.80874766416...	0.8706585300936
1	Yes	-10.24	-13.09...	-2.85...	1.15404764...	-2.4753455293...	-1.781083670262
2	Yes	-7.74	-8.873...	-1.13...	1.15405015...	-0.9820193498...	-1.038751367374
3	Yes	-5.32	-10.14...	-4.82...	1.15404764...	-4.1838249698...	-2.285778737470
4	Yes	-6.71	-9.929...	-3.21...	1.15404805...	-2.7901687790...	-1.890400239214
5	Yes	-9.82	-10.50...	-0.68...	1.15404764...	-0.5906746333...	-0.702357660998
6	Yes	-14.92	-14.03...	0.89...	1.19455279...	0.74295586044...	0.8151616906628
7	Yes	-13.51	-9.522...	3.99...	1.15134413...	3.46360889021...	2.2215195954410
8	Yes	-8.4	-9.498...	-1.09...	1.15405015...	-0.9517078953...	-1.007352957336
9	Yes	-12.63	-13.23...	-0.60...	1.15404764...	-0.5213534049...	-0.624363847817
10	Yes	-13.9	-12.58...	1.32...	1.15404764...	1.13802349888...	1.1048357312223
11	Yes	-8.96	-9.575...	-0.60...	1.15405172...	-0.5329951055...	-0.638817029000
12	Yes	-11.67	-12.825	-1.15...	1.15404764...	-1.0008252344...	-1.050426050580
13	Yes	-11.42	-12.13...	-0.71...	1.15404764...	-0.6224468629...	-0.728574777948
14	Yes	-14.76	-10.07...	4.69...	1.15134413...	4.06773499474...	2.4200219993155
15	Yes	-11.28	-9.906...	1.37...	1.15404764...	1.19001442016...	1.1397607987103
16	Yes	-6.15	-7.655...	-1.50...	1.15404764...	-1.3041056738...	-1.239258816220
17	Yes	-9.82	-7.585...	2.24...	1.15404764...	1.93666181712...	1.6357623422414
18	Yes	-8.52	-10.12...	-1.60...	1.15404764...	-1.3936455284...	-1.295909258906
19	Yes	-6.56	-9.773...	-3.21...	1.15404764...	-2.7844026723...	-1.880397095763
20	Yes	-10.12	-14.30...	-4.18...	1.15404764...	-3.6234783739...	-2.165304528825

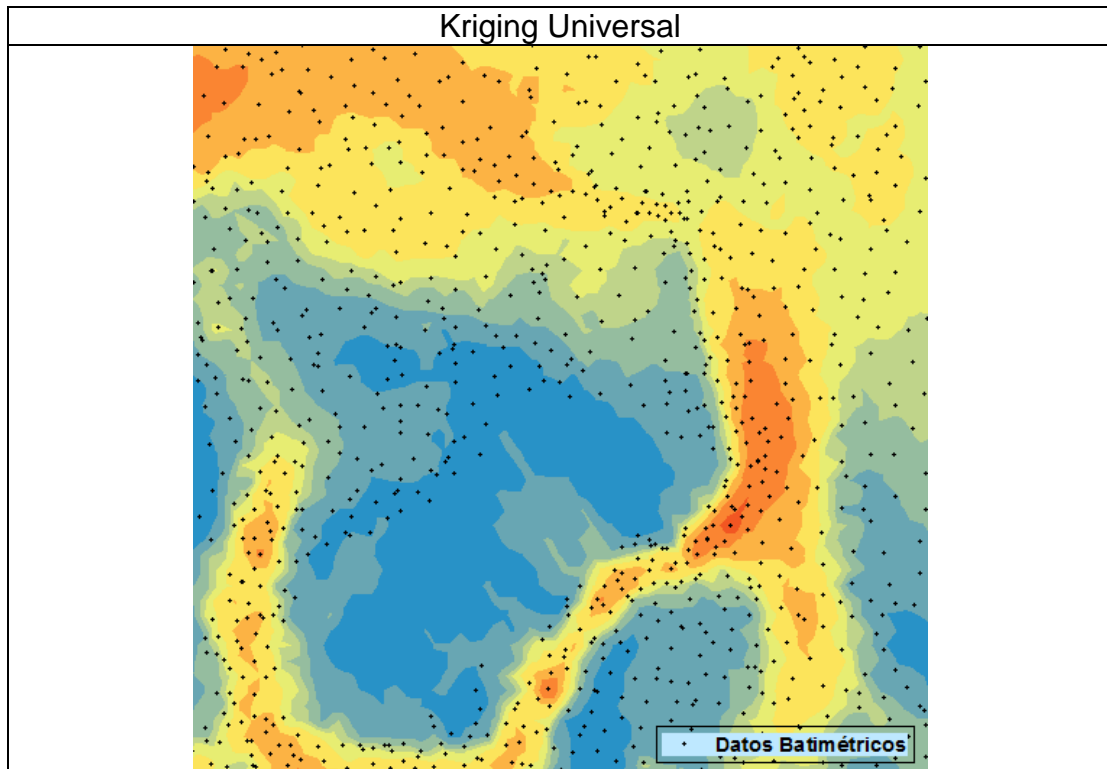
Prediction Errors	
Samples	1482 of 1482
Mean	-0,01778907
Root-Mean-Square	1,5269679792173498
Mean Standardized	-0,01495983
Root-Mean-Square Stan...	1,347451
Average Standard Error	1,115198





**Tabla 6.** Resultados Kriging Universal





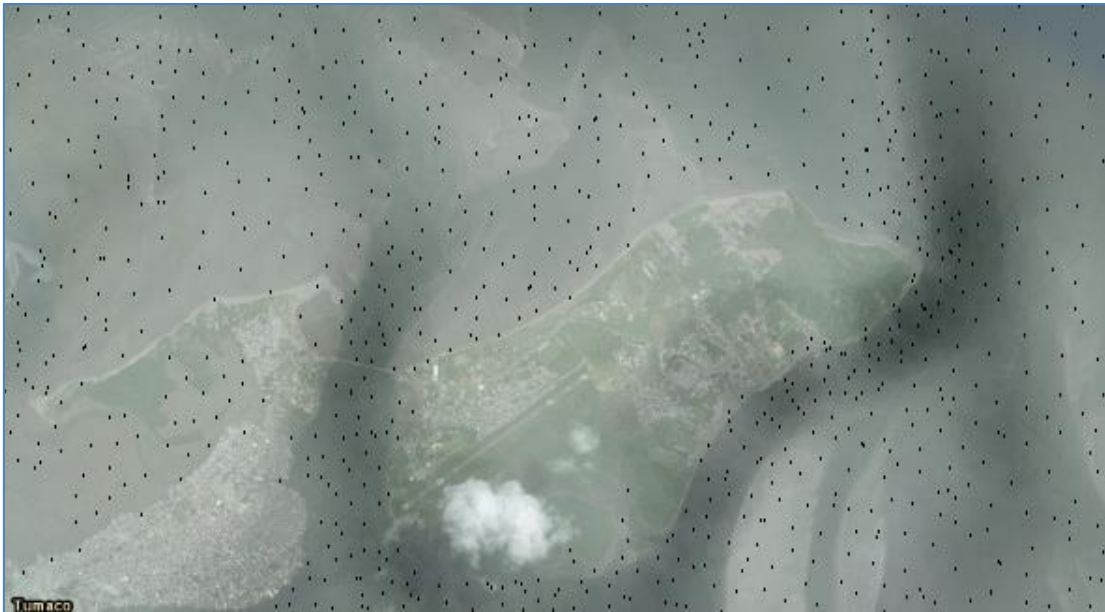
Después de generar los modelos con diferentes métodos, se compararon los coeficientes de determinación, el error medio cuadrático ( $R^2$ ) y el residuo de los errores, con el fin de determinar cuál de ellos se ajusta mejor a la generación del semivariograma. Como se observan en las tablas 5 y 6, correspondientes a métodos estadísticos, el  $R^2$  se estima en 1.526, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en el análisis exploratorio de datos, pues no existe tendencia a nivel visual, es decir la distribución es normal según el coeficiente de kurtosis. Por otro lado el Skewness es muy cercano a cero lo que indica una función simétrica.

Con el método determinístico IDW (tabla 3), se obtuvo un  $R^2$  de 1.512, siendo el menor valor de todos los métodos utilizados, lo cual indica que este es el que más se ajusta a los datos. Se realizó una verificación visual con los puntos de datos batimétricos y el raster generado a partir de este método y se encontró que los valores predichos corresponden a la realidad, por lo cual se toma el IDW para la generación del Modelo Digital de Elevación.

#### - **Actividad 2.** Generación del Modelo Digital de Elevación

Luego de comprobar la pertinencia del método determinístico IDW, se procede a determinar el tamaño de celda del *dataset* raster de salida, que en este caso es de 10 metros ya que es la precisión con la que se tomaron los datos batimétricos, seguido a esto, se fija el formato de salida TIFF para el *dataset* raster.

**Figura 18.** Modelo Digital de Terreno Batimetría en ArcGis 10.5



**Fuente.** Autoría propia

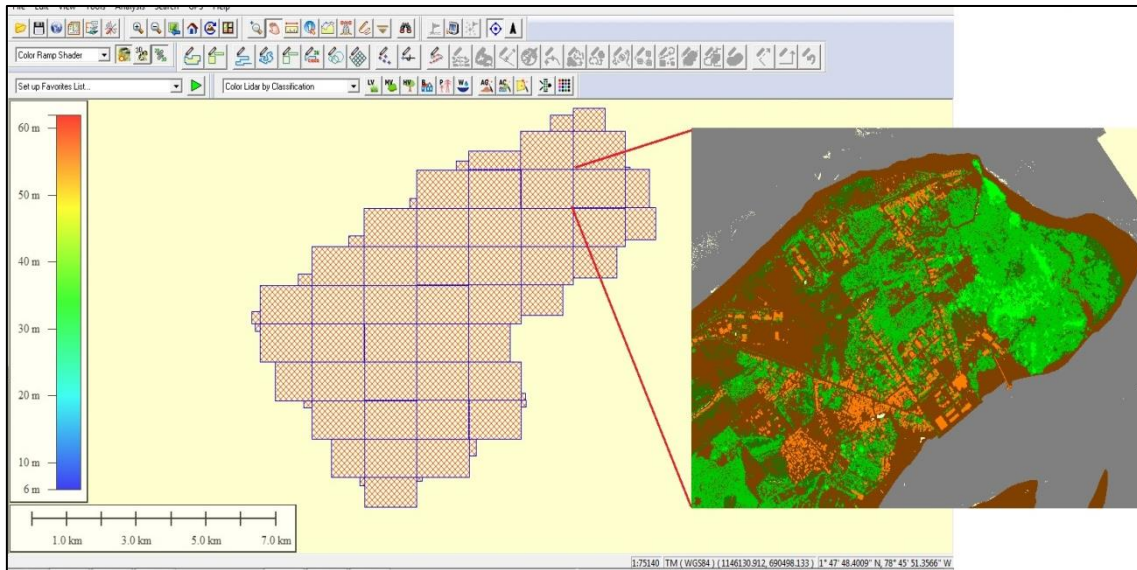
#### **5.1.4. Fase 4.** Generación de modelo digital a partir de datos LiDAR

##### **- Actividad 1.** Interpolación de datos LiDAR

Para realizar el Modelo Digital de Terreno a partir de los datos LiDAR, se utilizó el software Global Mapper versión 17.0; dada la robustez de los datos, este software ofrece una óptima visualización y manejo de los mismos.

Los datos LiDAR se cargan en un catálogo de mapas, con el sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste Oeste, misma proyección que tendrá el Modelo Digital de Elevación resultante.

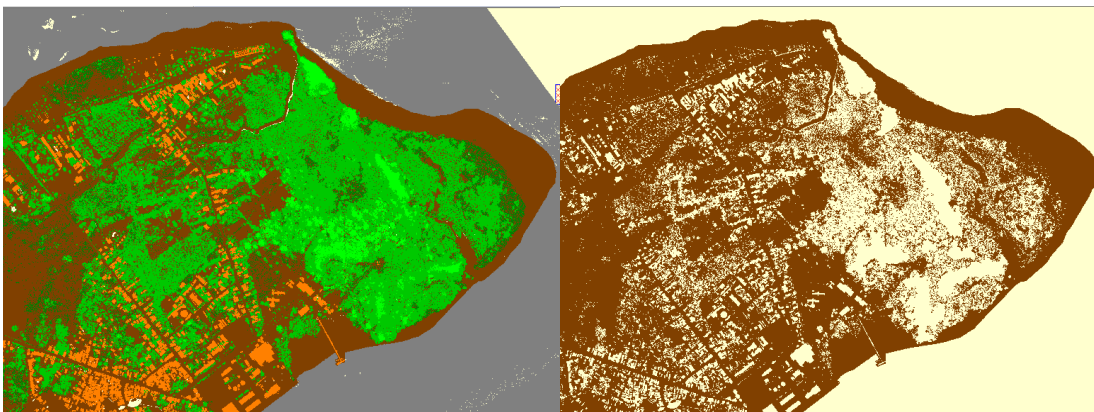
**Figura 19.** Despliegue de datos LiDAR en Global Mapper



**Fuente.** Autoría propia

Previamente, los datos LiDAR fueron clasificados en 6 categorías: suelo, vegetación baja, vegetación media, vegetación alta, construcciones y agua. En este caso, se quiere obtener un modelo digital de terreno, por lo cual se trabaja solo con los datos correspondientes a suelo y agua, en el caso en que se quisiera un modelo digital de superficie, se trabajaría con la totalidad de los datos, pero este no es objetivo del presente proyecto.

**Figura 20.** Filtrado de datos LiDAR por suelo y agua.

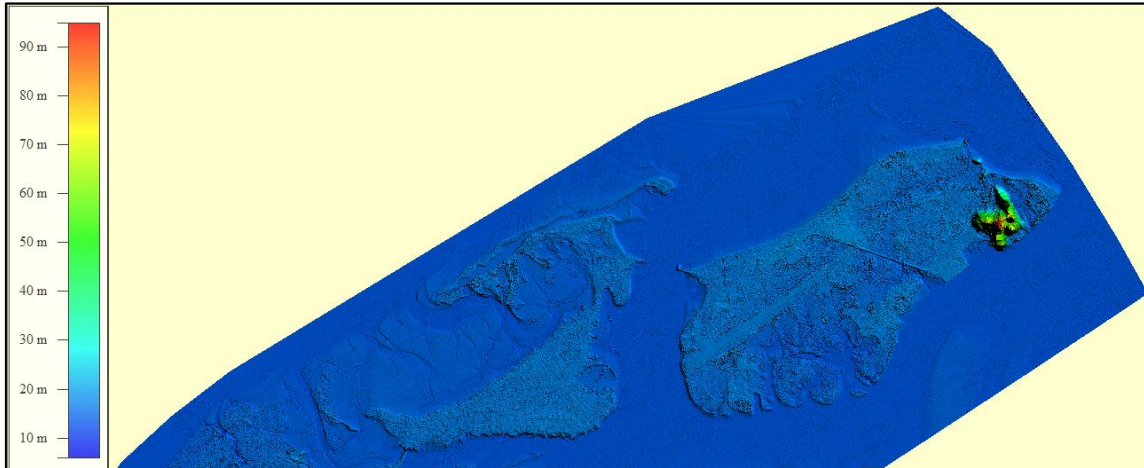


**Fuente.** Autoría propia

En Global Mapper, se realiza el modelamiento de la superficie con base en las triangulaciones de Delaunay, que consiste en la generación de una red irregular de triángulos (Triangulated Irregular Network - TIN) a partir de puntos. Para su generación se determinó un tamaño de celda de 1 metro dada la alta resolución en la toma de datos LiDAR. Como resultado, el software genera una capa con la superficie de elevación que debe ser exportada en formato DEM,

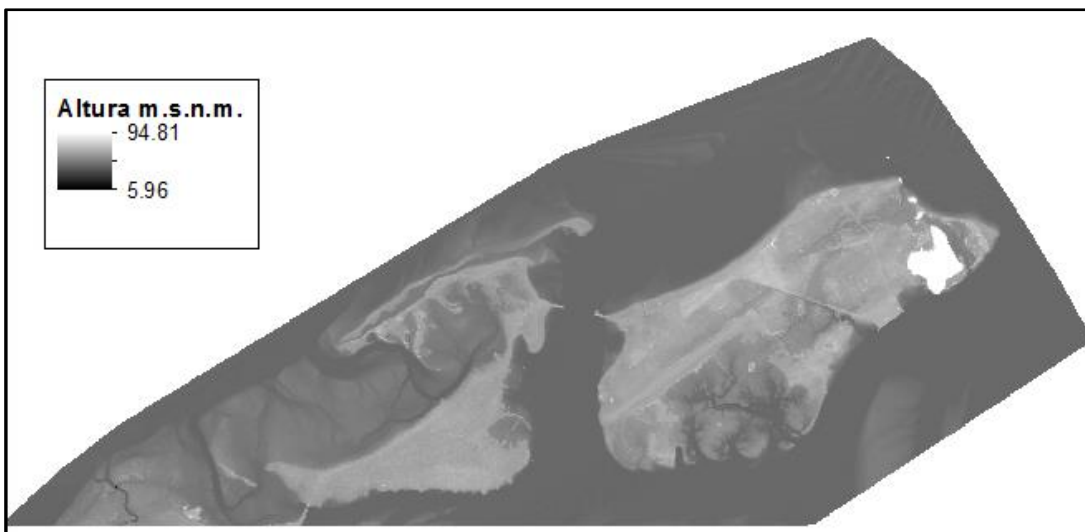
para su posterior manejo en el software ArcGIS, en el cual finalmente, se convierte a formato ráster.

**Figura 21.** Modelo Digital de Terreno en software Global Mapper.



**Fuente.** Autoría propia

**Figura 22.** Modelo Digital de Terreno en formato ráster

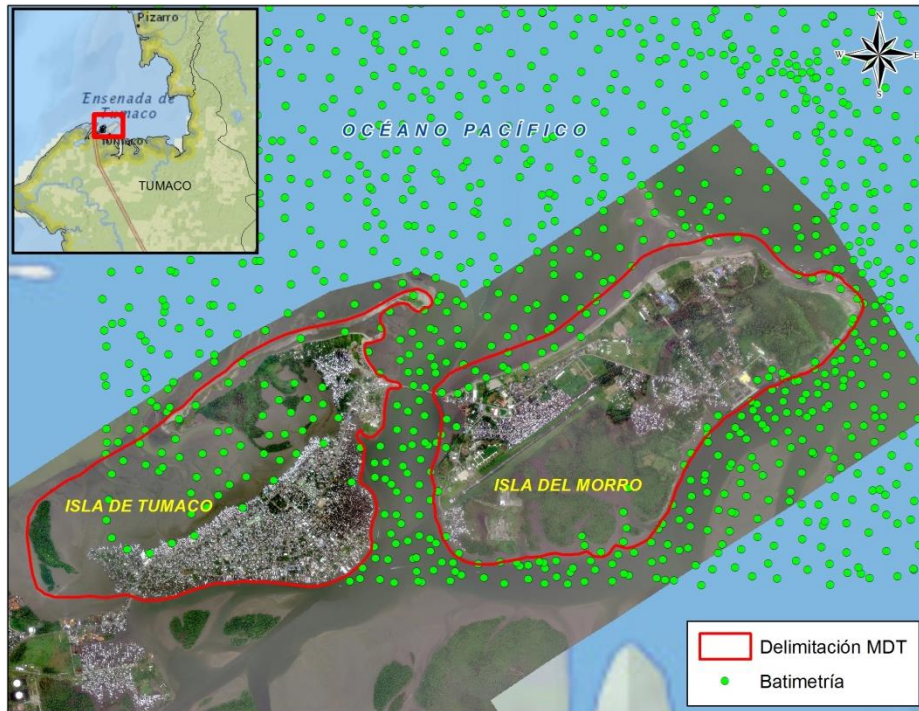


**Fuente.** Autoría propia

- **Actividad 2.** Delimitación del Modelo Digital de Terreno sobre el área de interés

Para realizar el mosaico de los modelos digitales de terreno obtenidos a partir de los datos batimétricos y los datos LiDAR, es necesario delimitar el área de la superficie del suelo de la Isla del Morro, que será el área límite del Modelo Digital de Terreno de los datos LiDAR. Para esta labor, se utilizó el mosaico de imágenes satelitales, de alta resolución, que permite diferenciar con gran precisión las áreas anteriormente mencionadas.

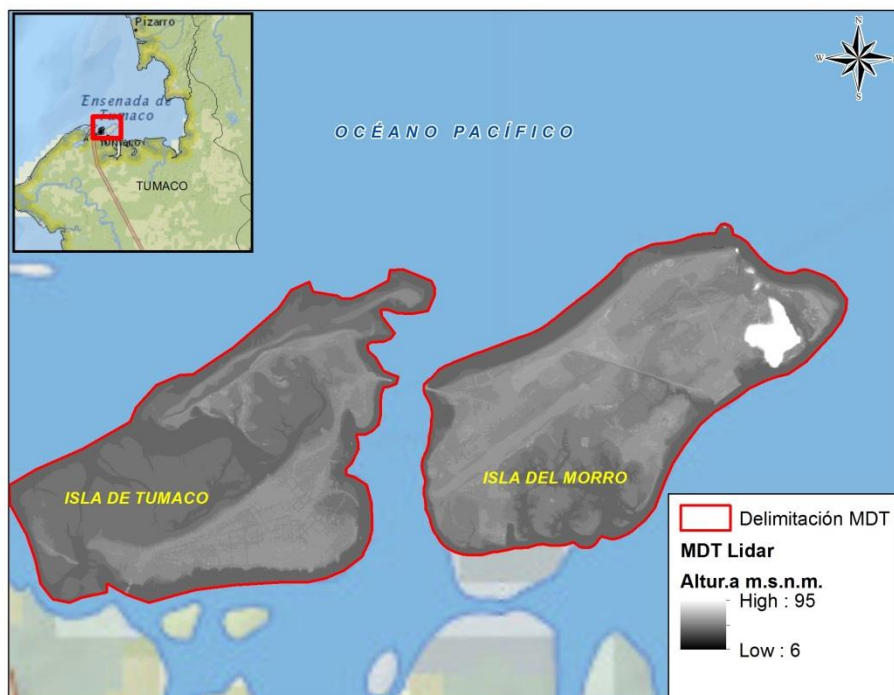
Figura 23. Área de interés para delimitación de MDT LiDAR



Fuente. Autoría propia

Con el área delimitada, se procede a cortar el archivo ráster del modelo digital de terreno en el software ArcGIS.

Figura 24. MDT LiDAR de área de interés

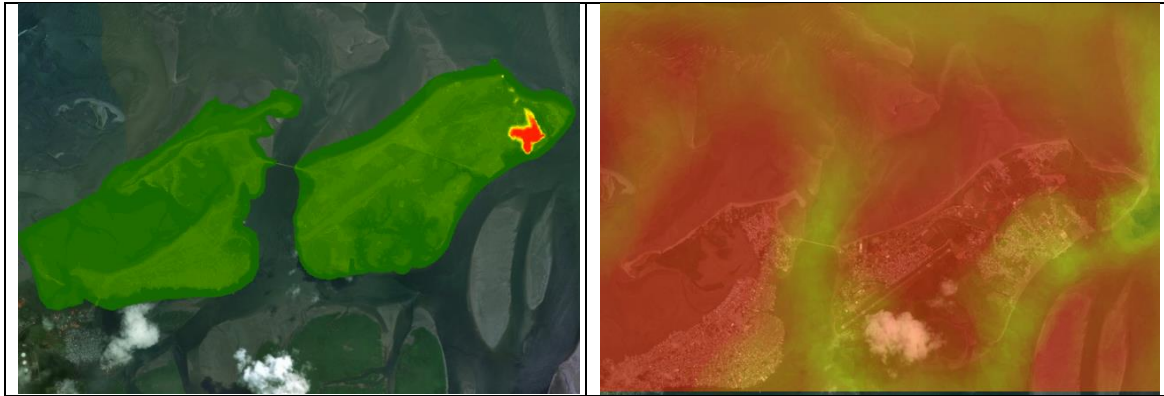


Fuente. Autoría propia

### 5.1.5. Fase 5. Elaboración de mosaico de los Modelos Digitales de Terreno

Para la elaboración del mosaico, es necesario tener los Modelos Digitales de Terreno realizados previamente con datos Lidar y datos de Barimetría.

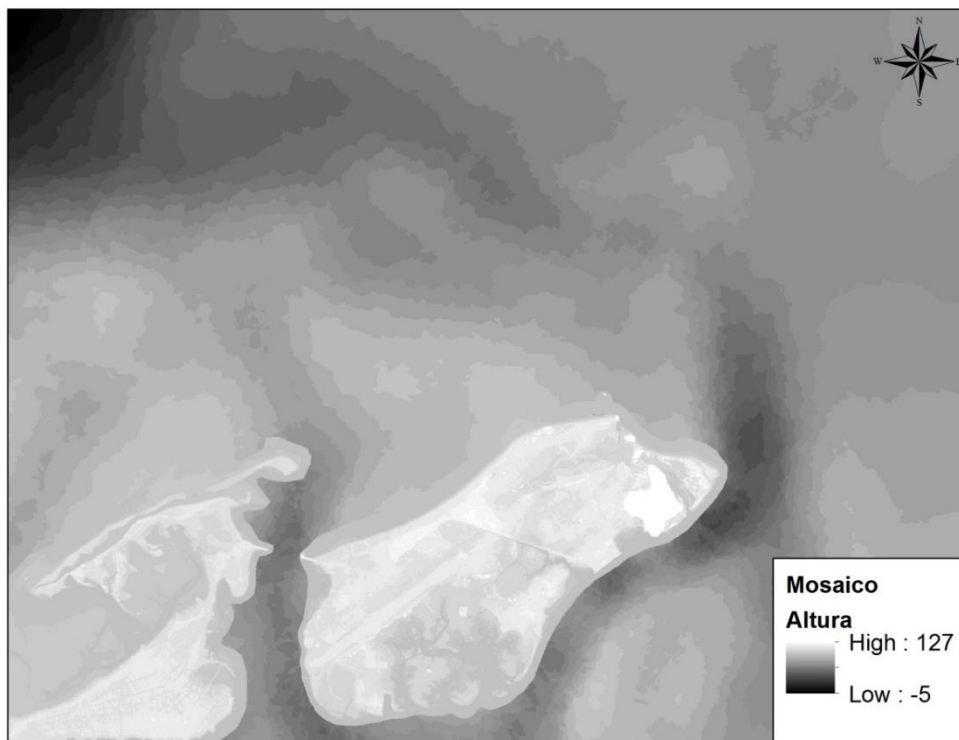
**Figura 25.** MDT LiDAR a la Izquierda – MDT Batimetria a la Derecha



**Fuente.** Autoría propia

En el Software ArcGis 10.5 con la herramienta *Mosaic to New Raster*, se unen los dos MDT, definiendo un pixel de 1 metro para no perder la resolución que permite el MDT LiDAR.

**Figura 26.** Mosaico – compuesto por MDT Lidar y MDT Batimetría.



**Fuente.** Autoría propia

### 5.2.6 Fase 6. Modelación de eventos extremos por medio del software ARCSCENE.

El nivel del mar en cualquier instante se ve afectado principalmente por dos procesos naturales: la marea astronómica, que es el proceso que más influencia tiene en el ascenso y descenso periódico del nivel del mar, y es debida a la fuerza de atracción gravitacional que ejercen la luna y el sol sobre la masa de agua terrestre; y la marea meteorológica, que es causada por la presión atmosférica y el viento. De igual manera, se ve afectado por factores no astronómicos como la línea costera, la distribución geográfica, la topografía local, la profundidad de las cuencas oceánicas, las influencias hidrográficas, entre otras, que cumplen un rol importante en su comportamiento.

Teniendo en cuenta que esta marcada diferencia entre pleamar y bajamar en el Pacífico, es un factor decisivo y repercute directamente en la inundación que se pueda generar en una población costera ante un posible evento tsunamigénico, es de gran importancia determinar el nivel del mar en un instante dado en cada una de las poblaciones bajo estudio.

Con la ayuda de estudios ya realizados, se determinaron eventos extremos. En el documento *“Evaluación de la amenaza por tsunami de origen cercano al que se encuentran expuestos los municipios de Tumaco y Buenaventura”*, realizado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico – CCCP en el 2014, se expone que para la bahía de Tumaco se realizaron procedimientos para determinar la amplitud registrada durante el evento de sicigia, que para este caso fue de 2.025 metros, el cual corresponde a la lectura RLS (el sensor RLS utiliza la tecnología de radar por impulsos para medir el nivel del agua sin contacto físico directo) de 1.97 metros. Posterior a esto, se suma la corrección para llevarlo a 2.255 metros, correspondiente al nivel MLWS (Altura Elipsoidal del Cero Histórico) del área de estudio, es decir, 2.25 metros es el valor que se toma como escenario posible para un evento de inundación.

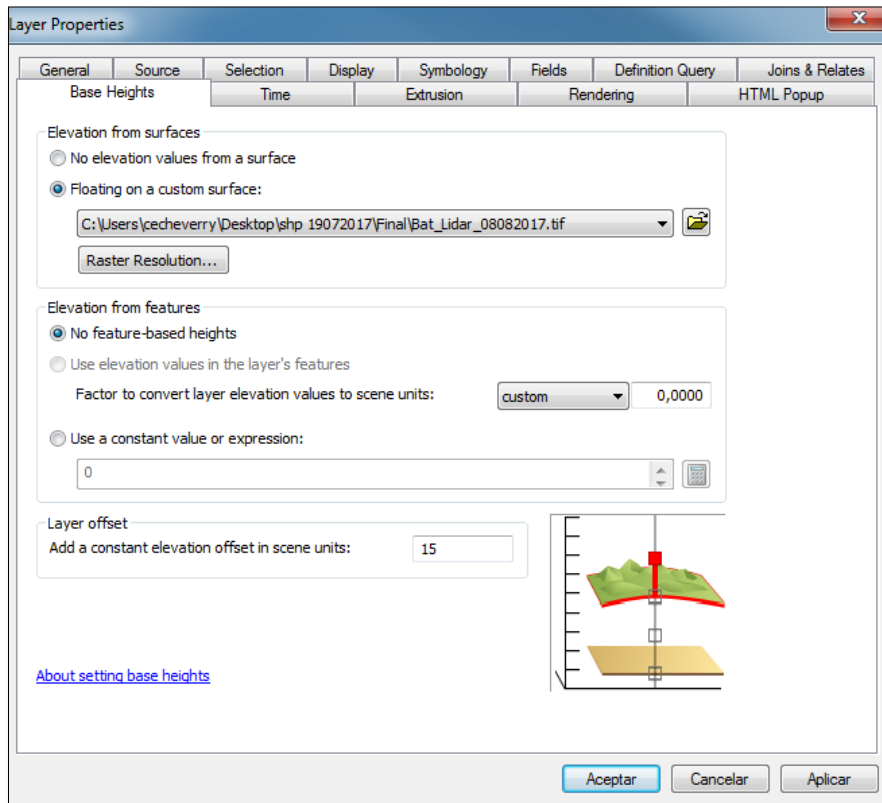
Para la realización de los eventos extremos, correspondientes a diferentes escenarios de inundación, son necesarios dos insumos:

1. Un polígono (rectángulo) que cubra en su totalidad el área de trabajo.
2. El mosaico resultado de la unión del MDT Lidar y el MDT Batimetría.

Este procedimiento se realiza en el software ArcScene de ESRI. Luego de cargar los insumos, en la ventana de propiedades de la capa del polígono se establecen los parámetros de superficie (Figura 25), partiendo de que el nivel medio del mar para el Municipio de Tumaco se encuentra entre 14 y 15 metros como se muestra en la Tabla 2.



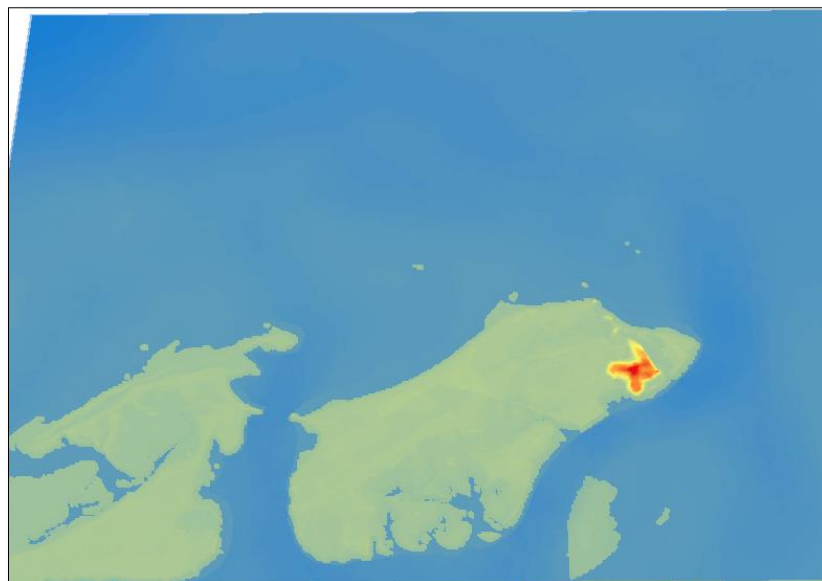
Figura 27. Configuración de propiedades capa Polígono.



Fuente. Herramientas de Geo procesamiento ARCSCE 10.5

Para el primer modelo, se utilizó un Nivel Promedio del Mar 15 metros para el área de trabajo seleccionada, lo que correspondería al nivel promedio que presenta en el municipio.

Figura 28. Modelo de Inundación Nivel Promedio del Mar 15 metros.



Fuente. Elaboración Propia.

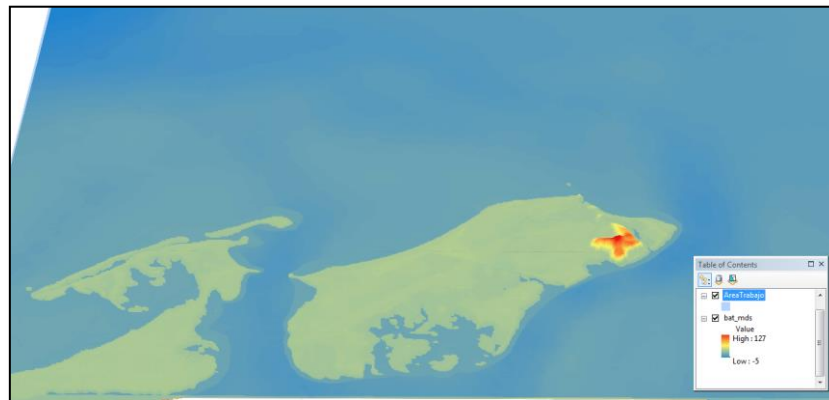
## 6. RESULTADOS

### 6.1. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

#### 6.1.1. Elaboración de escenario de inundación 1: Nivel medio del mar 16 metros.

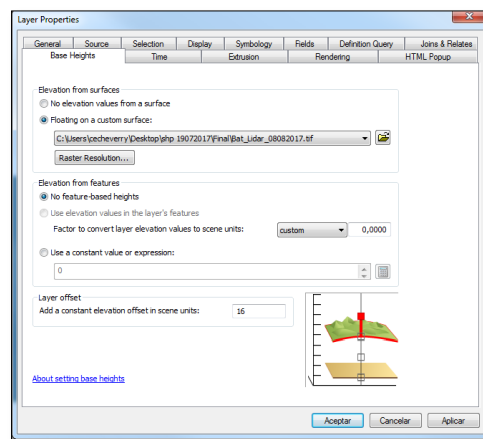
Para este primer escenario probable de inundación se estableció un Nivel Medio de Mar de 16 m. En este caso, se evidencian pequeñas zonas de inundación hacia el Oeste de Tumaco, siendo más notable en la bahía de Tumaco.

Figura 29. Modelo de Inundación Nivel Promedio del Mar 16 metros



Fuente. Elaboración Propia.

Figura 30. Ventana de configuración ArcScene V.10.5



Fuente. ArcScene V.10.5

Para este escenario de aumento del nivel del mar, se observa que la Isla del Morro no sufre una inundación considerable, ni se presenta ninguna afectación en las construcciones cercanas a la playa. En esta Isla, solo se evidencia una inundación en el área natural que limita al sur del Aeropuerto La Florida.

**Figura 31.** Afectación Isla del Morro - Zona contigua al Aeropuerto La Florida



Fuente. Elaboración Propia.

Por el contrario, ante un nivel medio del mar de 16 metros, la Isla de Tumaco presenta afectaciones en la zona noroccidental y oriental, siendo las construcciones de palafitos las principales damnificadas. En la zona oriental, se presenta un total de 20 manzanas con posible inundación.

Ante la ocurrencia de este escenario, se vería afectada un área de 51.32 Ha., correspondiente al 7% del área del casco urbano<sup>12</sup> (740.76 Ha.) que se encuentra dentro de la zona de estudio. De esta área, 12.46 Ha. corresponden a construcciones, todas localizadas en la Isla de Tumaco, sin incluir un amplio número de palafitos que se encuentran fuera de la delimitación del casco urbano.

<sup>12</sup> Información base obtenida del Marco Geoestadístico Nacional 2012, DANE.

**Figura 32.** Afectación Isla de Tumaco – Zona oriental



Fuente. Elaboración Propia.

**Figura 33.** Afectación la de Tumaco - zona noroccidental

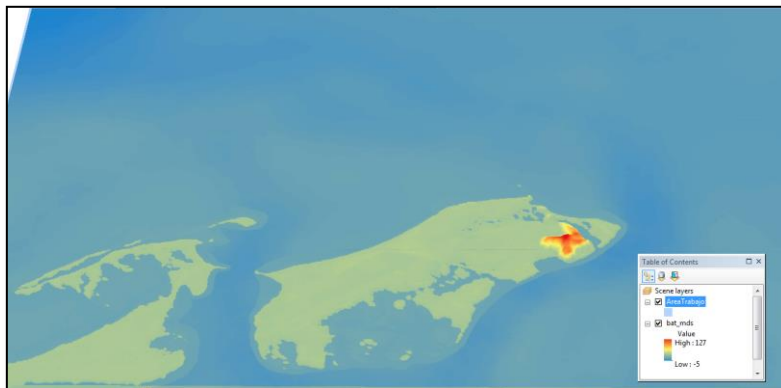


Fuente. Elaboración Propia.

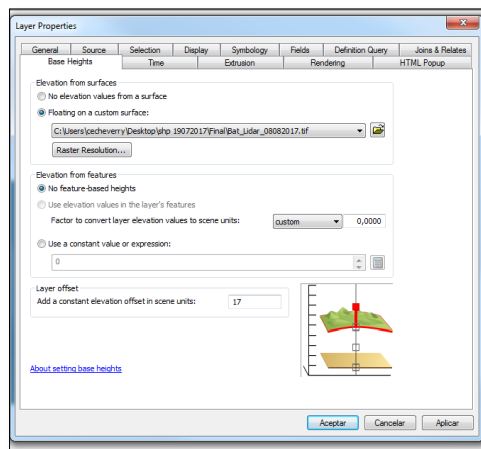
### 6.1.2. Elaboración de escenario de inundación 2: Nivel medio del mar 17 metros.

Para este escenario probable de inundación se estableció un Nivel Medio de Mar de 17 m, que coincide con los eventos de Sicigia reportados para la Bahía de Tumaco. En este modelo se ve con más detalle que ciertos sectores serán gravemente afectados, sin contar con la acción mecánica de las olas que podrían romper al interior de la tierra causando importantes daños.

Figura 34. Modelo de Inundación Nivel Promedio del Mar 17 metros



Fuente. Elaboración Propia.



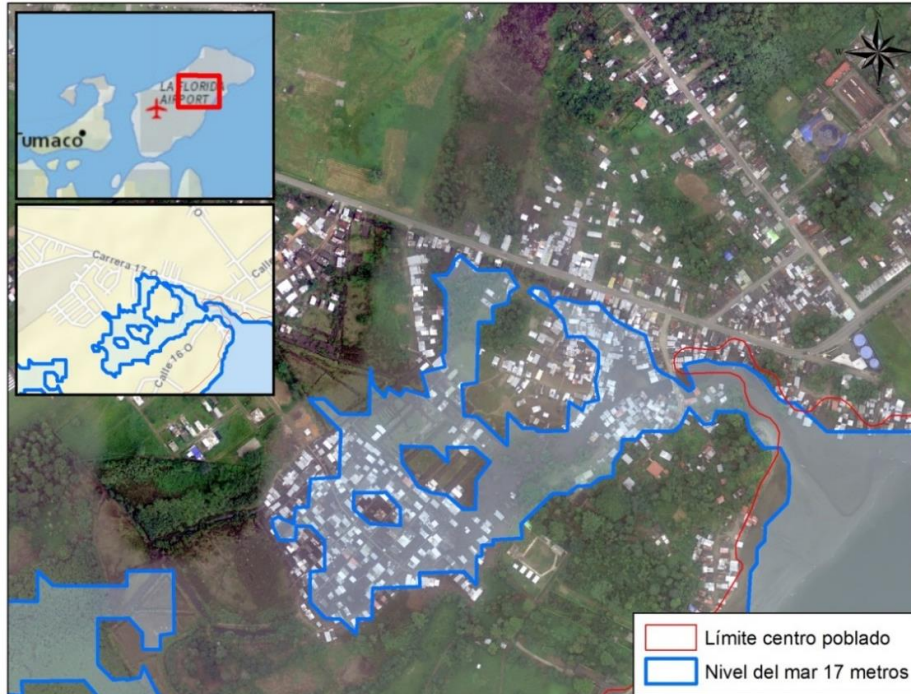
Fuente. Ventana de configuración ArcScene Vo.10.5

Ante la ocurrencia de este escenario, se tiene un área de 154.87 Ha correspondientes al 20% del área del centro poblado con posible inundación, dentro de las que se incluyen zonas de playa, áreas naturales y construcciones. Del área afectada, aproximadamente 38.58 Ha. corresponden a áreas construidas, esto sin contar las construcciones de palafitos que no están incluidas dentro de la delimitación del casco urbano utilizada.

En la Isla del Morro se presenta afectación en algunas construcciones localizadas en el barrio Exporcol, en el costado sur de la carrera 170. Asimismo, el área que limita por el costado sur del Aeropuerto La Florida, tiene

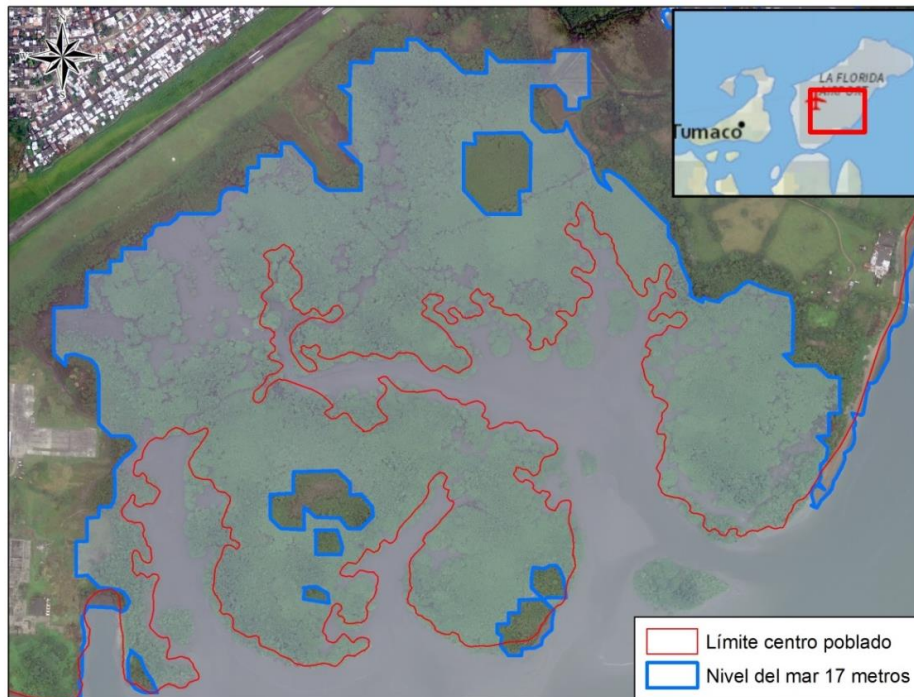
una inundación de aproximadamente 70.2 Ha. siendo el área con mayor afectación en la Isla.

**Figura 35.** Afectación Isla del Morro - Cercanía barrio Exporcol



**Fuente.** Elaboración Propia.

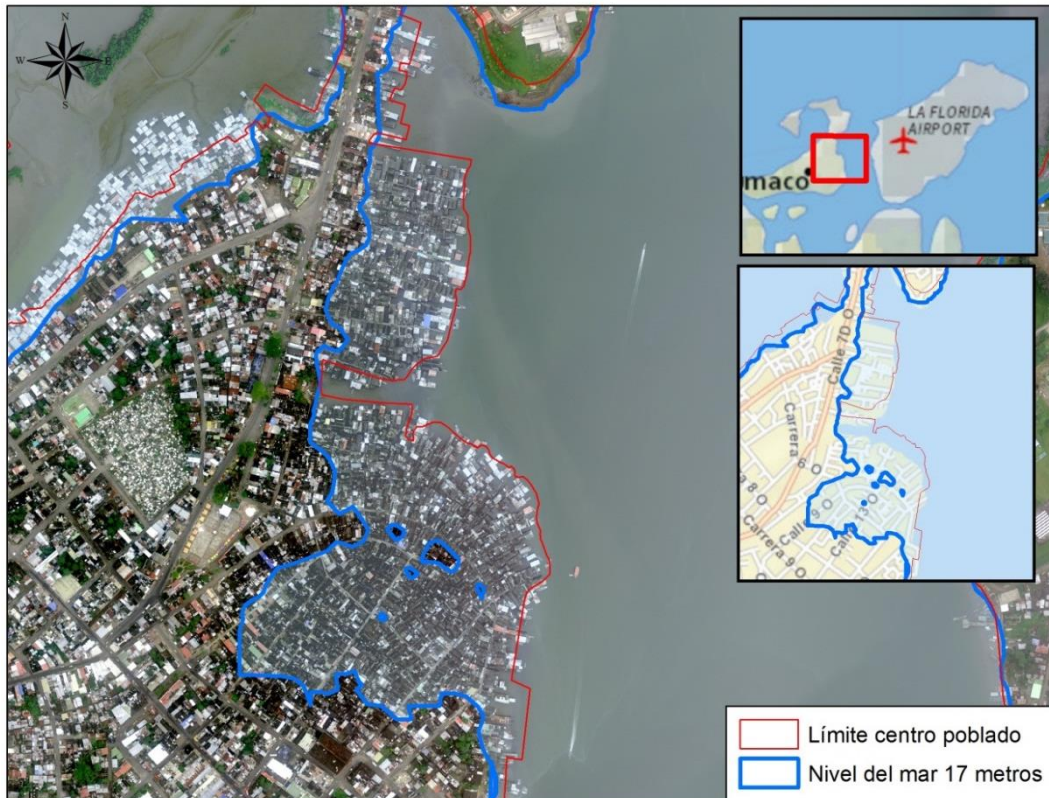
**Figura 36.** Afectación Isla del Morro - Zona contigua al Aeropuerto La Florida



**Fuente.** Elaboración Propia.

En la Isla de Tumaco, se observa una gran cantidad de viviendas afectadas en la zona oriental, entre la calle 9, calle 6a y la carrera 8; y en todo el costado occidental de la Isla, desde la calle 1 y en cercanías a la calle 5 o Avenida La Playa, para un total de 29 manzanas afectadas en la parte oriental y 58 en el costado occidental, sin contar las áreas constituidas por palafitos que no están incluidas dentro de la cartografía oficial utilizada.

**Figura 37.** Afectación Isla de Tumaco - Zona oriental



Fuente. Elaboración Propia.

**Figura 38.** Afectación Isla de Tumaco - Zona Oriental

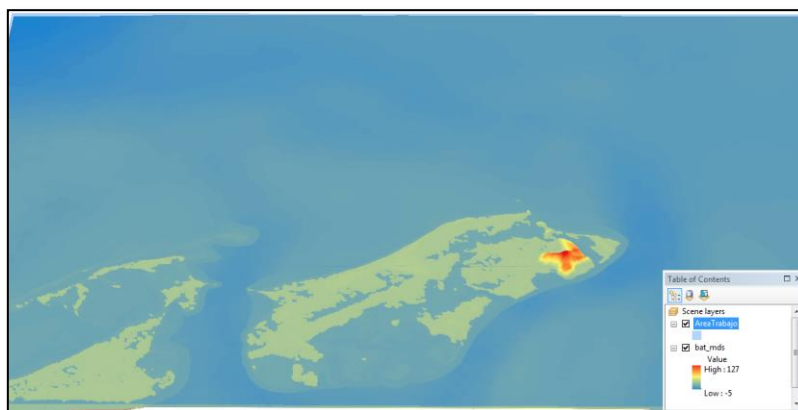


Fuente. Elaboración Propia.

### 6.1.3. Elaboración de escenario de inundación 3: Nivel medio del mar 18 metros.

Para este escenario probable de inundación se manejó un Nivel Medio de Mar de 18 m, que también coincide con los eventos de Sicigia reportados para la Bahía de Tumaco. En este modelo se ven con detalle los grandes sectores de inundación, son claras las zonas de afectación y la desaparición de los palafitos ubicados en bahía de Tumaco, del mismo modo se pueden encontrar las zonas seguras que corresponden a la zona del Morro y parte norte del área de estudio.

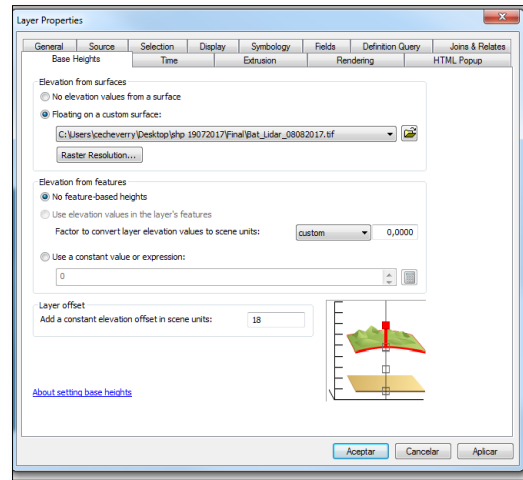
**Figura 39.** Modelo de Inundación Nivel Promedio del Mar 18 metros



Fuente. Elaboración Propia.



Figura 40. Ventana de configuración ArcScene Vo.10.5



Fuente. ArcScene Vo.10.5

Ante la ocurrencia de este escenario se observa inundación sobre aproximadamente un 40 % del área del casco urbano, de los cuales un 28% corresponde a zonas construidas, con un mayor número de construcciones afectadas en la Isla de Tumaco. Como se ilustra en las figuras 39 y 40, en esta isla se verían damnificadas todas las construcciones localizadas al costado occidental de la Avenida La Playa, que también se afectaría, y es vía principal que comunica la isla con la Isla del Morro y el resto del municipio.

Figura 41. Afectación isla de Tumaco - zona noroccidental



Fuente. Elaboración Propia.

De igual forma, se tendría un aproximado de 45 manzanas afectadas en la zona occidental de la isla, dentro de las cuales se encuentran una parte del área de la Clínica Miramar y del cementerio municipal, presentándose inundaciones al costado oriental de la calle 7d, desde la clínica Miramar hasta la carrera 9 y al costado occidental entre calle 5 y carrera 7. Finalmente, como se ilustra en la figura 40, ante este aumento del nivel del mar se presentaría una inundación en todo el sector de El Bajito.

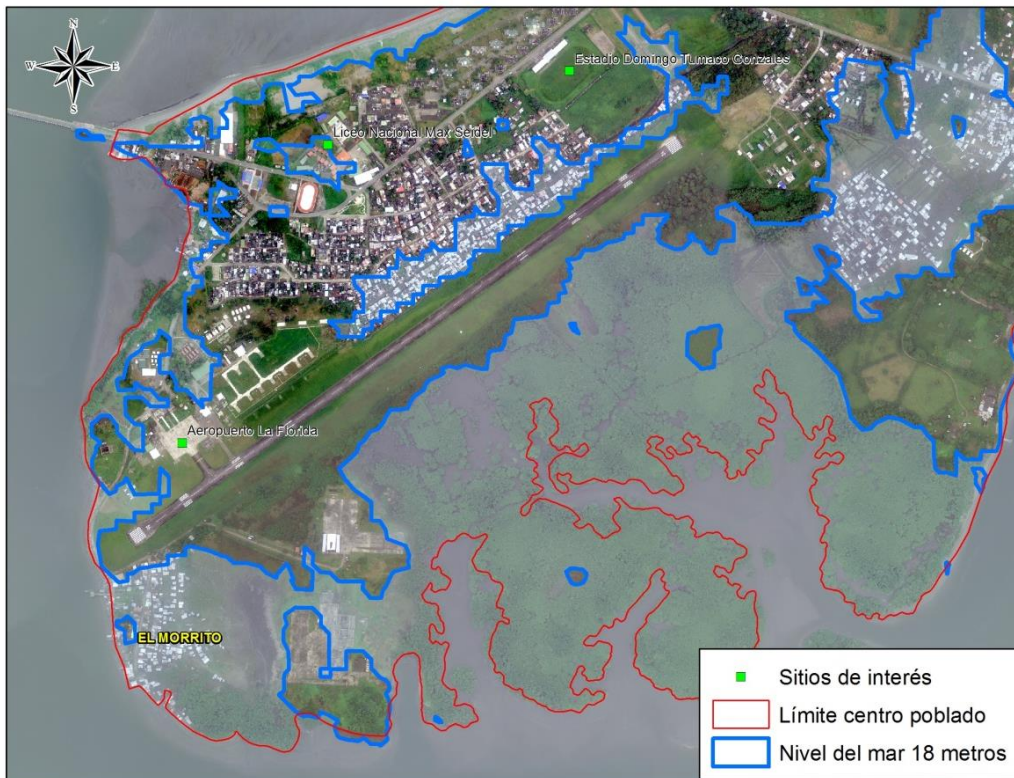
**Figura 42.** Afectación Isla de Tumaco -Zona nororiental



**Fuente.** Elaboración Propia.

Por su parte, en la Isla del Morro la mayor área inundada se presentaría en zonas sin construir, como el área contigua al aeropuerto La Florida en la que se observa una inundación en su totalidad. Sin embargo, se observan inundaciones considerables en zonas construidas, como el sector de El Morrito, que también limita con el aeropuerto, y en el sector de Exporcol, en el 80% de las viviendas localizadas al costado occidental de la vía calle 17 o que también se vería afectada.

**Figura 43.** Afectación Isla del Morro - Zona occidental



Fuente. Elaboración Propia.

**Figura 44.** Afectación Isla del Morro - Zona oriental



Fuente. Elaboración Propia.

#### 6.1.4. Delimitación de zonas seguras

Partiendo de la espacialización de los escenarios de inundación descritos anteriormente, ante la ocurrencia del aumento del nivel del mar a 16 y 17 metros, en la Isla de Tumaco se consideran zonas seguras los sectores comprendidos entre la Avenida la Playa o Ruta Nacional 10, la calle 7d, calle 9, carrera 8 y el límite municipal por el costado sur. En el escenario de un nivel medio del mar a 18 metros, se tendrían como zonas seguras los sectores localizados entre la Avenida la Playa, aunque esta tendría afectación hacia el norte de la carrera 9; la carrera 6, carrera 8 y la calle 14 hasta conectar con la calle 12. Dentro de esta área, se encuentran predios que podrían ser utilizadas en caso de evacuación, tales como el Colegio Manuel Elkin Patarroyo, la Institución Educativa Misional Santa Teresita y la terminal de buses de Tumaco. Es importante resaltar que ante esta eventualidad no se verían afectados los centros de salud principales, como son el Hospital San Andrés y el Hospital Divino Niño, no obstante, la Clínica Miramar podría presentar daños.

Figura 45. Zonas seguras Isla de Tumaco



Fuente. Elaboración Propia.

De otro lado, como se mencionó en la descripción de los diferentes escenarios, la Isla del Morro al presentar coberturas naturales, pastos y playas en la mayoría de su área, tendría una menor afectación en cuanto a número de

construcciones, sin embargo, el sector de Exporcol sobre los dos costados de la ruta nacional 10, se vería perjudicado. Ante la ocurrencia de un aumento de nivel del mar a 18 metros, en esta isla se presentan como zonas seguras el Batallón Fluvial de Infantería Marina, el Estadio Domingo Tumaco Gonzales y el Aeropuerto La Florida, además de otros sectores localizados entre la ruta nacional 10 y el Aeropuerto la Florida; el barrio localizado entre calles 1 y 2 y las construcciones situadas entre carreras 1 y 2, al norte de la ruta nacional 10.

Figura 46. Zonas seguras Isla del Morro



Fuente. Elaboración Propia.

## 6.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos obedecen a un ejercicio realizado bajo el supuesto de un aumento del nivel del mar con respecto al normal para el municipio de Tumaco, establecido en 14.45 metros según el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico – CCCP (Ver tabla 2), indistintamente del origen de dicha variación, cuyo estudio implicaría recursos, procedimientos y conocimientos muy especializados sobre el fenómeno de inundación. A diferencia de estudios realizados anteriormente sobre el mismo fenómeno, en los cuales se realizaron inspecciones en campo y se tuvo disponibilidad de información más detallada, para el desarrollo de este trabajo existieron limitantes en cuanto al acceso a la información, no obstante, los recursos y la metodología utilizada fueron suficientes para cumplir el objetivo principal del proyecto.

Para el desarrollo de este trabajo, se hizo uso de Sistemas de Información Geográfica, teniendo como insumos datos LIDAR, datos batimétricos, imágenes de satélite disponibles en servicios web como Google Earth y fotografías aéreas, con lo cual se logró una buena aproximación a las características de interés de la zona de estudio, correspondientes a alturas del terreno, profundidad del suelo marino e información catastral, como manzanas, vías y equipamientos; todos fundamentales para cumplir los objetivos del proyecto en una zona que no cuenta con información base oficial suficiente y actualizada, demostrando de esta forma la utilidad de las herramientas utilizadas para delimitar zonas seguras ante un aumento en el nivel medio del mar y en general, su validez para soportar los procesos de toma de decisiones, teniendo en cuenta que su confiabilidad depende de la disponibilidad de información, calidad de los insumos, correcto procesamientos de información y el desarrollo de una metodología adecuada.

## 7. CONCLUSIONES

- Históricamente, en el municipio de Tumaco se han presentado diferentes fenómenos naturales como terremotos y tsunamis en repetidas ocasiones. Esta clase de antecedentes demuestran que la Isla del Morro y la Isla de Tumaco están en constante amenaza de inundación, lo cual hace necesario tener planes de gestión del riesgo ante la ocurrencia de dichos fenómenos. La elaboración de mapas de zonas seguras, como los obtenidos con la elaboración del presente proyecto, es fundamental para que la población más vulnerable pueda establecer las rutas de evacuación. Asimismo, la identificación de zonas potencialmente inundables, pueden ser una base para planificar medidas que reduzcan los impactos negativos que se producen por este fenómeno.
- Con el uso de herramientas los Sistemas de Información Geográfica fue posible procesar la información obtenida a partir de las técnicas de LiDAR y de batimetría, para generar un Modelo Digital de Elevación con una resolución de 5 metros, que representa la altura de terreno y la profundidad del suelo marino, producto con el que fue posible modelar tres escenarios con diferentes cotas de inundación para la Isla de Tumaco y la Isla del Morro, obteniendo una aproximación de las zonas que se verían más afectadas ante la ocurrencia de este fenómeno y una delimitación de zonas seguras para realizar planes de evacuación; resultados que demuestran la utilidad de los SIG para procesos de prevención y mitigación de desastres, cuya confiabilidad depende fundamentalmente de la calidad de los insumos y el correcto procesamiento de los mismos, además de un amplio conocimiento de la zona de interés y del fenómeno objeto de estudio.
- Fuentes de información como los Servicios Geográficos Web del IGAC, las plataformas Google Maps y Google Earth y el Marco geoestadístico nacional del DANE, constituyen un elemento muy útil para tener un conocimiento del territorio en lugares sobre los cuales no se tiene información base oficial actualizada, como es el caso del municipio de Tumaco. Para dar alcance al análisis de resultados ante los diferentes escenarios de inundación se consultaron estas fuentes secundarias, que permitieron dar una delimitación y descripción aproximada de las zonas afectadas, sin embargo, la precisión de los resultados se vio limitada por las diferentes escalas de información utilizadas.
- Sobre la zona de estudio, la Isla de Tumaco presenta una alta susceptibilidad ante la ocurrencia de eventos de inundación dada la dinámica de su crecimiento y a la tipología de sus construcciones. Como se observó en los resultados obtenidos, las áreas constituidas por palafitos son las más afectadas y las primeras en recibir el impacto ante el aumento del nivel medio del mar, se debe mencionar que esta Isla sigue extendiéndose hacia el costado norte, con la construcción de viviendas palafíticas que no cuentan con ningún parámetro de seguridad ante la ocurrencia de fenómenos naturales, como son las inundaciones. En estas

zonas no se cuenta con ninguna estructura de evacuación ni rutas establecidas que permitan mitigar los daños materiales y humanos.

- Realizar un adecuado control de calidad a los datos LiDAR y datos batimétricos, y contar con ortofotos de alta resolución con las cuales se pueda observar con claridad la zona de estudio, son requerimientos fundamentales para la correcta elaboración de productos como los Modelos Digitales de Terreno, ya que de la calidad y el correcto procesamiento de los datos depende la precisión de los resultados obtenidos y su posterior análisis para la toma de decisiones.



## 8. RECOMENDACIONES

El desarrollo oportuno y eficaz de normas de regulación dirigidas al análisis estructural, tratamientos y usos de las construcciones y del suelo, determinarían un factor para generar pautas para identificación de riesgos por inundación, todo ello con el fin de establecer la inclusión de ellas en el ordenamiento territorial de las zonas afectadas. Paralela a esta evaluación, sería adecuado dentro de la ejecución de prevención y análisis de impactos, tener medidas informativas y de participación ciudadana que permita implementar políticas públicas resultado de la implementación de normas de edificabilidad, de modo que pueda reducirse el impacto derivado de una inundación.

A partir de los resultados obtenidos y objetivos logrados, se pueden interpretar y establecer una serie de pautas, que podrían contemplarse dentro de la evaluación de riesgos, una de ellas es la “evacuación vertical”, consistente en ocupar edificios o construcciones sólidas de altura, que ayudaría a lograr una más rápida acción o respuesta en el caso de un evento que implique evacuación. Esta alternativa permite librar de un peligro mayor las denominadas “zonas de sacrificio”, que se encuentran localizadas a una distancia menor al epicentro o son sitios aledaños la zona costera, dado que las mismas, impiden ser objeto de evacuaciones horizontales; además se contemplarían otros posibles factores, como el bloqueo de vías y el daño de infraestructuras, que eventualmente impedirían el desplazamiento oportuno de la zona de desastre. Con esta medida entonces, se reduciría sustancialmente el número de víctimas fatales, frente a un evento de este tipo, disminuyendo las pérdidas en las llamadas “zonas de sacrificio”.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Cardona Orozco, Y., Toro, F., Vélez, J., & Otero Díaz, L. (2007). Estimación de la amenaza por inundación generada por ondas de tsunami considerando la altura y velocidad de la lámina de agua inundante para el municipio de Tumaco. *Boletín Científico CCCP*, 19-30.
- Afanador Franco, F., Torres Parra, R., Gómez López, J., & Gutiérrez Briceño, J. (15 de 08 de 2006). Lidar y fotografía aérea digital en la determinación del impacto del aumento en el nivel medio del mar en el sector de "La Boquilla", Cartagena de Indias; Caribe Colombiano. *Boletín Científico CIOH - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas*, 94-106.
- Alcaldía Municipal de Tumaco, Nariño. (2008 - 2019). Plan de Ordenamiento Territorial Tumaco Nariño 2008 - 2019. Tumaco - Colombia.
- Cámara de Comercio de Tumaco. (2015). *CAMARA DE COMERCIO DE TUMACO DIANOSTICO REGIONAL*. Tumaco.
- Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP. (2003). *Aportes Al Entendimiento de la Bahía de Tumaco. Entorno Oceanográfico, Costero y de Riesgos*. Tumaco.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico - CCCP. (2014). *Evaluación de la amenaza por tsunami de origen cercano l que se encuentran expuestos los municipios de Tumaco y Buenaventura*. San Andrés de Tumaco.
- Chuvienco Salinero, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio* (Tercera ed.). Madrid, España: Ariel.
- Comisión Oceanográfica Intergubernamental. (2013). Glosario de tsunamis. París, Francia. Obtenido de <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001882/188226s.pdf>
- ESRI. (s.f.). *ArcGIS for desktop*. Recuperado el 1 de Junio de 2017, de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>
- ESRI. (s.f.). *Cómo funciona Kriging*. Obtenido de ArcGIS Desktop: [https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm#ESRI\\_SECTION1\\_7245621C6C2D4B4A8B01E64C88BDF9B6](https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm#ESRI_SECTION1_7245621C6C2D4B4A8B01E64C88BDF9B6)
- F. Farreras, S., Domínguez Mora, R., & Gutiérrez Martínez, C. (Agosto de 2005). *Centro Nacional de Prevención de Desastres, México*. (V. Ramos Radilla, Ed.) Obtenido de <http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieFasciculos/fasciculotsunami.pdf>
- Farjas Abadía, M. (s.f.). *Open Course Ware, Universidad Politécnica de Madrid*. Recuperado el 11 de Junio de 2017, de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría: [http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-ii/Teoria\\_Batimetria\\_Tema\\_13.pdf](http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-ii/Teoria_Batimetria_Tema_13.pdf)
- Fernández Palomino, C., & Lavado Casimiro, W. (Septiembre de 2014). Análisis comparativo de métodos de interpolación espacial para la elaboración de mapas climáticos de precipitación. (O. Obando, & M. Casaverde Riveros, Edits.) Lima, Perú. Obtenido de Senamhi.gob.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (Mayo de 2010). Amenazas costeras. Bogotá D.C., Colombia. Recuperado el 1 de Julio de 2017, de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/Amenazas+Costeras.pdf/2d134cc7-063e-43c3-8ef2-c76fa25c1cdd>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2014). *Informe de levantamiento cotas cero estaciones hidrométricas en la región de la Mojana*. Bogotá. Recuperado el 10 de Mayo de 2017, de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/16006/Cotas+Cero+La+Mojana+Diciembre+2014/6424a572-bb84-4f08-a773-3b78a5cb96b4>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (Mayo de 2010). Amenazas Costeras. (M. C. Cadena, Recopilador) Bogotá D.C., Colombia. Recuperado el 1 de Junio de 2017, de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/Amenazas+Costeras.pdf/2d134cc7-063e-43c3-8ef2-c76fa25c1cdd>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (s.f.). *Modelo Geoidal de Colombia*. Recuperado el 15 de Julio de 2017, de [http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/TramitesServicios/FueraDeServicio/!ut/p/c4/04\\_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hHT3d\\_JydDRwN3A083A08j1MDIxBXYwsnE\\_2CbEdFAGrs9jg!/?WCM\\_POR\\_TLET=PC\\_7\\_AIGOB1A0G0IF0I2B50DTE38R4\\_WCM&WCM\\_GLOBAL\\_CONTEXT=/wps/wcm](http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/TramitesServicios/FueraDeServicio/!ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hHT3d_JydDRwN3A083A08j1MDIxBXYwsnE_2CbEdFAGrs9jg!/?WCM_POR_TLET=PC_7_AIGOB1A0G0IF0I2B50DTE38R4_WCM&WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm)
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica - IMN. (Julio de 2017). *ENOS*. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/enos>
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. (s.f.). *Efectos de los huracanes*. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31306/8-EFECTOS+ASOCIADOS+A+UN+HURACAN.pdf/f7f8ac98-cd28-4d9c-b753-bb3765ef8357>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI. (s.f.). *Geoide Gravimétrico Mexicano*. Recuperado el 14 de Julio de 2017, de [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/que\\_es\\_geoide.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/que_es_geoide.aspx)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. (s.f.). *Modelo digital de elevación de alta resolución LiDAR, Tipo terreno con resolución de 5m*. Recuperado el 10 de Mayo de 2017, de INEGI.ORG: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/presentacion.aspx>
- Matamoros, O. (1994). *Análisis de la amenaza de licuefacción, lavas, lahares y caída de cenizas volcánicas en la región caribe norte de Costa Rica*. Obtenido de [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/300/Analisis\\_de\\_la\\_amenaza\\_de\\_la\\_licuefaccion.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/300/Analisis_de_la_amenaza_de_la_licuefaccion.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Menéndez Fernández, M. (Julio de 2012). Aplicación de técnicas geoestadísticas en la estimación de área basimétrica. *Universidad de Oviedo. Escuela Politécnica de Mieres*. Oviedo, España.
- Ministerio de Medio Ambiente, Universidad de Calabria, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Cotas. (s.f.). *Cota de Inundación: Atlas de inundación del litoral peninsular español*. España. Recuperado el 15 de

- Julio de 2017, de  
<http://ec.europa.eu/ourcoast/download.cfm?fileID=1570>
- Nicolae Lerma, A., François Thoma, Y., Durand, P., Torres, R., & Andrade, C. (2008). Variabilidad del nivel del mar desde 1950 hasta el 2000 y riesgos asociados a episodios de mar de leva en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande, Cartagena de Indias, Colombia. *Boletín Científico CIOH No. 26*, 72 - 85.
- Ojeda, J., Vallejo, I., Hernández Calvento, L., & Álvarez Francoso, J. (Enero de 2007). Fotogrametría Digital y LiDAR como fuentes de información en geomorfología litoral (Marismas mareales y sistemas dnares): El potencial de su análisis espacial a través de SIG. *Boletín de la A.D.E. No. 44*, 215 - 233.
- Pontificia Universidad de Chile. (2017). *Percepción remota satelital aplicada al mar*. Recuperado el 13 de Mayo de 2017, de [www7.uc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/html/h52.html](http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h52.html)
- Real Sociedad Española de Física. (s.f.). *Mareas oceánicas*. Recuperado el Julio de 2017, de <https://rsef.es/images/Problemas/OEF2014/P2-OEF-2014.pdf>
- Ruiz, A., & Kornus, W. (Febrero de 2003). Experiencias y aplicaciones del LiDAR. 8. Recuperado el 28 de Mayo de 2017, de [https://www.researchgate.net/publication/266866563\\_EXPERIENCIAS\\_Y\\_APLICACIONES\\_DEL\\_LIDAR](https://www.researchgate.net/publication/266866563_EXPERIENCIAS_Y_APLICACIONES_DEL_LIDAR)
- Sanchez García, J. (2012). *Sistema LiDAR integrado en un UAV para la generación de Modelos Digitales del Terreno*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería - Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Sarria, F. (s.f.). *Sistmas de Información Geográfica*. Recuperado el Julio de 2017, de SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia: <http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Subdirección General de Programación, Subgerencia de Informática y Sistema Geográfico del Agua, Jefatura de Control Cartográfico. (2005). *Percepción Remota: Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ciudad de México, México. Recuperado el 1 de Mayo de 2017, de <http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>
- Telecentro Regional de Tecnologías Espaciales. (2017). *Geoservice.igac.gov.co*. Recuperado el 13 de Mayo de 2017, de [http://geoservice.igac.gov.co/contenidos\\_telecentro/fundamentos\\_pr-semana1-unidad1/index.php?id=31](http://geoservice.igac.gov.co/contenidos_telecentro/fundamentos_pr-semana1-unidad1/index.php?id=31)
- Tomás, R., López Sánchez, J. M., & Delgado Marchal, J. (Enero de 2005). Técnicas de Ingeniería Cartográfica empleadas en el estudio de subsidencia y movimientos de ladera: principales características y análisis comparativo. *Researchgate*, 11.
- Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital. (s.f.). *NTC 5205.Norma Técnica Colombia*. Obtenido de Glosario: <https://www.ideca.gov.co/es/node/292>
- Vicente, P. (2008). *Repositorio Institucional Universidad Politécnica de Cartagena*. Obtenido de [http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/146/12\\_Interpolacion.pdf;jsessionid=E6EAEDD5B9D79AD63E21C28EB7B8E542?sequence=15](http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/146/12_Interpolacion.pdf;jsessionid=E6EAEDD5B9D79AD63E21C28EB7B8E542?sequence=15)

*www.filesuffix.com*. (s.f.). Recuperado el 14 de Mayo de 2017, de  
<https://www.filesuffix.com/es/extension/las>