

**DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE ALERTA TEMPRANA POR
VARIACIÓN EXTREMA EN EL NIVEL DEL MAR COMO UNA CONTRIBUCIÓN
A LA DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD POR RIESGO DE TSUNAMI
EN LAS POBLACIONES COSTERAS DEL LITORAL PACÍFICO COLOMBIANO**

ANA LUCIA CAICEDO LAURIDO

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2011**

**DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE ALERTA TEMPRANA POR
VARIACIÓN EXTREMA EN EL NIVEL DEL MAR COMO UNA CONTRIBUCIÓN
A LA DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD POR RIESGO DE TSUNAMI
EN LAS POBLACIONES COSTERAS DEL LITORAL PACÍFICO COLOMBIANO**

ANA LUCIA CAICEDO LAURIDO

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniera Electrónica**

**Director
Ing. JOSÉ VICENTE ESPAÑA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2011**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”.

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966. Emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

Jurado

Jurado

Asesor

San Juan de Pasto, Abril de 2011

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la vida y permitirme compartirla con mi hermosa familia, la que me ha dado siempre su apoyo incondicional y sincero en cada paso de mi vida, a mis amigos y compañeros de universidad por compartir conmigo momentos de inmensas alegrías y triunfos, como también, profundas tristezas y dificultades.

A mí querido y siempre recordado Ingeniero José Dolores Rodríguez, por estar ahí en aquellos momentos en los que sentí que mi fé y esperanza se desvanecían, por sonreír cuando yo lo hacía, y sobre todo por creer siempre en mí.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. DESCRIPCION DE LA EMPRESA ENLINEA LTDA.....	27
2. METODOLOGIA	28
2.1 ESTUDIO DE LA DOCUMENTACIÓN TEÓRICA EXISTENTE Y DE LAS ESPECIFICACIONES TECNICAS Y REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	28
2.1.1 Teoría general de mareas.....	28
2.1.1.1 Marea astronómica.....	28
2.1.1.2 Marea meteorológica.....	30
2.1.1.3 Tipos de mareas.....	31
2.1.1.4 Medidores del nivel del mar	32
2.1.1.5 Análisis de mareas en términos frecuencia- tiempo.....	34
2.1.2 Tsunamis	35
2.1.2.1 Generación, propagación y llegada a la costa de un tsunami.....	36
2.1.2.2 Antecedentes de tsunami	38
2.1.3 Modelación numérica de tsunamis empleando el modelo MOST.....	42
2.1.4 Sistemas de detección de Tsunamis.....	43
2.1.5 Sismos, placas y fallas tectónicas:.....	45
2.1.5.1 Sismos.....	45
2.1.5.2 Placa tectónica.....	46
2.1.5.3 Fallas tectónicas	47
2.1.6 Costa pacífica colombiana.....	48
2.1.7 Características físicas de una onda de tsunami en la costa pacifica colombiana	50
2.1.8 Equipo de comunicación UHF	52
3. PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN	54

3.1.	ESTUDIO Y DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE SENSADO.....	54
3.1.1	Fuentes de información batimétrica y topográfica.....	57
3.1.2	Selección de las mallas de cálculo para el modelo TIME.	57
3.1.3	Selección de los puntos de extracción de señales sintéticas de tsunamis.	59
3.1.4	Estado de la marea (TIME.	59
3.1.5	Sismos precursores seleccionados.....	59
3.2	EQUIPOS DE SENSADO DEL NIVEL DEL MAR.....	71
3.2.1	Longitud del cable.....	75
3.2.2	Relación potencia con la longitud del cable.....	76
3.3	ANÁLISIS COMPARATIVO Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL ENLACE INALÁMBRICO.....	77
3.3.1	Evaluación de parámetros generales:.....	77
3.3.1.1	Impacto ambiental y urbanístico.....	77
3.3.1.2	Cobertura.....	77
3.3.1.3	Afectación meteorológica.....	78
3.3.1.4	Atenuación por gases atmosféricos.....	78
3.3.1.5	Conductos por evaporación de agua.....	79
3.3.1.6	Brisa marina.....	79
3.3.1.7	Ancho de banda y capacidad de transmisión.....	79
3.3.1.8	Costos.....	80
3.3.1.9	Licencias.....	80
3.4	SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL ENLACE.....	80
3.4.1	Identificación de los sitios de emplazamientos:.....	81
3.4.1.1	Estación transmisora o remota.....	81
3.4.1.2	Estación repetidora.....	82
3.4.1.3	Estación Maestra o terrestre.....	84
3.5	DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN.....	84
3.5.1	Comunicación en la banda de frecuencia UHF.....	84

3.5.2	Comunicación satelital.....	92
3.6	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN FOTOVOLTAICO	95
3.6.1	Requerimientos del sistema de alimentación.....	95
3.6.2	Paneles solares	95
3.6.3	Baterías	96
3.6.4	Regulador de carga	96
3.7	DISEÑO DE LA BOYA.....	97
3.7.1	Dimensiones de la boya de acuerdo a los equipos del sistema.....	97
3.7.2	Material de construcción de la boya de acuerdo a las condiciones ambientales de instalación.....	99
3.7.3	Flotabilidad y soporte de la boya	99
3.8	DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE DETECCIÓN DE VARIACIONES EXTREMAS EN EL NIVEL DEL MAR DE TIPO TSUNAMIGENICO.	101
3.8.1	Estudio del registro instrumental.....	101
3.8.2	Detección de errores del registro	102
3.8.3	Análisis del registro instrumental.	103
3.8.3.1	Análisis en el dominio de la probabilidad	103
3.8.3.2	Análisis en el dominio de la frecuencia.	105
3.8.3.3	Análisis armónico	109
3.9	UMBRAL DE DETECCIÓN DE VARIACIONES EXTREMAS EN EL NIVEL DEL MAR DE TIPO TSUNAMIGÉNICO	112
3.9.1	Cambios de presión en la columna de agua debido al abrupto descenso del nivel del mar.....	112
3.9.2	Umbral de ruido del fondo oceánico	113
3.9.3	Cambios significativos en los componentes espectrales presentes en el nivel del mar.	113
3.10	TARJETA DE DESARROLLO	117
3.10.1	Requerimientos de la tarjeta para el sistema de detección de tsunamis	118
3.11	ALGORITMO DE DETECCIÓN DE TSUNAMIS DE ORIGEN CERCANO.....	120

3.12	ADQUISICION Y VISUALIZACION DE DATOS EN MATLAB	124
4.	PRESUPUESTO.....	125
5.	CONCLUSIONES	126
6.	RECOMENDACIONES.....	128
	BIBLIOGRAFIA	129

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación tiempo versus frecuencia como resultado de la aplicación de la transformada de Wavelets.	35
Figura 2. Onda tsunami y su comportamiento de la ola a su arribo a la costa. .	36
Figura 3. Etapas de generación de un tsunami debido a un sismo producido en una zona de subducción.....	37
Figura 4. Alcance y hora de llegada de la ola tsunami.	39
Figura 5. Alcance y hora de llegada de la ola tsunami producida en Japón 2011.	40
Figura 6. Desaparición de la isla del guano como consecuencia del tsunami en 1979.	41
Figura 7. Pantalla de configuración del MOST	42
Figura 8. Esquema general del sistema DART.....	44
Figura 9. Centro de Alerta Temprana por tsunami y estación mareográfica ubicados en la base naval de Tumaco	45
Figura 10. Zona de subducción.	46
Figura 11. Placas Nazca, Suramericana y Caribe.	47
Figura 12. Tipos de desplazamientos de la falla.....	48
Figura 13. Principales poblaciones costeras en la Costa Pacífica Colombiana...	49
Figura 14. Radio módems UHF MHX 910 A y su Diagrama físico	52
Figura 15. Carta náutica COL 032 que representa la bahía de Buenaventura y Tumaco, en la cual se observa la batimetría de la zona de estudio. .	55
Figura 16. Mallas anidadas empleadas en el cálculo numérico con el modelo MOST.	58
Figura 17. Localización de epicentros sísmicos de origen cercano empleados en el TIME.	60

Figura 18. Localización de epicentros sísmicos de origen cercano empleados en el MOST.	61
Figura 19. Población de vaquería.	63
Figura 20. Puntos de instalación parciales del sistema de alerta temprana para la Bahía de Tumaco.	64
Figura 21. Pantalla de configuración del MOST de las simulaciones realizadas.	65
Figura 22. Mallas de cálculo empleadas en la modelación numérica con el MOST. a) Malla externa A, b) malla intermedia B y c) malla de inundación	66
Figura 23. Señales sintéticas obtenidas con el sismo de 8.2 Mw con dos fallas activas paralelas a la zona de subducción del Pacífico entre Ecuador y Colombia.	67
Figura 24. Señales sintéticas obtenidas con el sismo de 8.2 Mw con cuatro fallas activas paralelas a la zona de subducción del Pacífico entre Ecuador y Colombia	68
Figura 25. Señales sintéticas obtenidas con el sismo de 8.8 Mw con cuatro fallas activas paralelas a la zona de subducción del Pacífico entre Ecuador y Colombia.	69
Figura 26. Sensores de presión con los cuales se obtuvieron los registros mareales necesarios en la investigación y funciones de mantenimiento realizadas. a) Sensor SBE-50, b) sensor SBE-37.....	72
Figura 27. Programación del sensor SBE-37 y pantalla de configuración del software SeaTerm.	73
Figura 28. Relación existente entre el rango de frecuencia y la atenuación.....	79
Figura 29. Edificación “El Faro” ubicada al interior de la DIMAR-CCCP en Tumaco.	82
Figura 30. Instalaciones de la Dirección General Marítima en San Andrés de Tumaco donde se indica la estación receptora (CAT) y la estación repetidora (Faro).....	83
Figura 31. Configuración del enlace UHF.....	85

Figura 32.	Puntos de instalación de las estaciones en Radio Mobile	85
Figura 33.	Ventana de Propiedades de las Redes de Radio Mobile.	86
Figura 34.	Perfil orográfico, rango y distribución de la señal de transmisión entre la estación maestra y la estación repetidora.	88
Figura 35.	Patrones de salto empleados en una comunicación con repetidores.	89
Figura 36.	Configuración punto a punto con repetidor.....	90
Figura 37.	Imagen correspondiente al análisis de espectro obtenido en el radioenlace implementado Faro-Batallón 70.....	91
Figura 38.	Instalaciones de prueba del sistema de comunicación UHF desde la edificación el Faro en las instalaciones de la DIMAR en Tumaco.	92
Figura 39.	Mapa de cobertura del sistema BGAN.	92
Figura 40.	Equipo terminal para comunicación satelital HNS9201 BGAN.	93
Figura 41.	Dimensiones generales de la boya.....	98
Figura 42.	Aplicación de fibra de vidrio a una estructura de boya.	99
Figura 43.	Diagrama pictórico de la distribución del sistema de sensado.	100
Figura 44.	Principales Parámetros de la estadística descriptiva del registro instrumental obtenida mediante el análisis Wavelets.	104
Figura 45.	Principales Parámetros de la estadística descriptiva de la señal residual obtenida mediante el análisis Wavelets.	105
Figura 46.	FFT del registro instrumental completo, arriba el espectro original y abajo con la aplicación stem de MATLAB.	106
Figura 47.	Densidad espectral de la señal residual en un periodo de 30 minutos correspondiente a 120 datos registrados.	107
Figura 48.	Componentes de frecuencia de la señal original tomando un periodo de 30 minutos representado en 120 datos registrados.	108
Figura 49.	De izquierda derecha columnas correspondientes al consecutivo de datos, marea real, marea generada y residuo metereológico.	109
Figura 50.	Componentes armónicas del registro mareal.	110
Figura 51.	En color azul el nivel de marea registrada, en color verde marea generada por el ARM y color rojo residuo.	110

Figura 52.	Residuo correspondiente al registro instrumental.	111
Figura 53.	Densidad espectral de las componentes armónicas presentes en Tumaco encontradas por el IDEAM.....	111
Figura 54.	Tsunami de Chile registrado por mareógrafos en la base naval de Tumaco y la modelación numérica correspondiente al evento realizada con el MOST.	114
Figura 55.	Análisis armónico del mareograma sintético desarrollado con el ejecutable ARM. Con color azul se representa la marea generada, con rojo el mareograma sintético original y con el color verde la señal residual.	115
Figura 56.	Respuesta en frecuencia de la señal residual obtenida después de filtrar las componentes mareales de los mareogramas sintéticos obtenidos en la posición de la boya C. Fuente: Autor.	116
Figura 57.	Esquema general de la tarjeta Ethernut 3.1	120
Figura 58.	Diagrama de flujo del sistema de detección de variaciones extremas en el nivel del mar.....	123
Figura 59.	Interfaz gráfica principal del software	124

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales componentes maréales de origen astronómico	30
Tabla 2. Principales características generales de los medidores del nivel del mar tipo radar y sensor de presión	33
Tabla 3. Características físicas de un tsunami originadas por sismos precursores en la costa pacífica. Fuente: Autor	51
Tabla 4. Especificaciones técnicas del radio- modem MHX-910 A	53
Tabla 5. Puntos seleccionados por inspección visual para la instalación del sistema de sensado de alerta temprana.....	56
Tabla 6. Características de las mallas empleadas en las modelaciones realizadas con el MOST y el TIME	58
Tabla 7. Posición de los puntos de detección analizados con el modelo TIME	59
Tabla 8. Localización de epicentros sísmicos empleados en la modelación numérica realizada con el TIME	60
Tabla 9. Localización de epicentros sísmicos empleados en la modelación numérica realizada con el MOST	61
Tabla 10. Resultados de las simulaciones realizadas con el modelo TIME.	62
Tabla 11. Características de los puntos parcialmente determinados por inspección visual de los mapas. Fuente: Autor.....	64
Tabla 12. Resultados de la simulación con 8.2 Mw con dos fallas.....	67
Tabla 13. Resultados de la simulación con 8.2 Mw con cuatro fallas.....	68
Tabla 14. Resultados de la simulación con 8.8 Mw con cuatro fallas activas.....	69
Tabla 15. Variaciones en amplitud detectadas en la posición de la boya C.	71
Tabla 16. Características principales de los sensores de presión.....	74
Tabla 17. Longitudes de cable permitidas de acuerdo a la velocidad de transmisión de los datos.....	75
Tabla 18. Relación entre el calibre del cable y su correspondiente resistencia..	76

Tabla 19.	Alcance máximo de las principales tecnologías de comunicaciones inalámbricas.	78
Tabla 20.	Tecnologías de enlace inalámbricas con la tasa de transmisión máxima que soportan.	80
Tabla 21.	Características de la estación Repetidora	83
Tabla 22.	Parámetros utilizados en la simulación de los radioenlaces.....	86
Tabla 23.	Resultados del cálculo de radio enlace con Radio Mobile.....	87
Tabla 24.	Relación entre los patrones de salto y el espectro de frecuencia usado.....	90
Tabla 25.	Principales características del sistema HNS9201 BGAN.	93
Tabla 26.	Características eléctricas de los equipos. Fuente: Autor	95
Tabla 27.	Dimensiones de los elementos y equipos que serán instalados en la boya.....	97
Tabla 28.	Relación de la presión hidrostática y la profundidad en un océano estándar.	102
Tabla 29.	Datos de presión registrados por el sensor SBE-37 y su correspondiente equivalente de profundidad en un periodo de 5 minutos.....	103
Tabla 30.	Descenso del nivel del mar de acuerdo a las modelaciones numéricas	113
Tabla 31.	Frecuencias obtenidas en las modelaciones numéricas realizadas con el MOST en la boya C.	117
Tabla 32.	Características de la tarjeta Ethernet.	119
Tabla 33.	Descripción de las expresiones utilizadas en el algoritmo computacional.	121

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Simulaciones realizadas para la validación del programa Radio Mobile por medio de la comparación de los resultados obtenidos en la implementación del radioenlace Faro-Batallón.	131
Anexo 2. Modelación Numérica realizada con el programa MOST del tsunami ocurrido en Japón el 11 de Marzo de año 2011, en donde se realiza el análisis del tiempo de arribo de la primera ola, la amplitud de la misma y posible amenaza de inundación al municipio de San Andrés de Tumaco. Posteriormente se realiza la comparación entre los datos registrados por la estación mareográfica de tipo radar ubicada en el muelle de Guardacostas de la base Naval y la señal sintética obtenida a través del MOST.....	134
Anexo 3. Código fuente del programa realizado en Matlab para la adquisición y procesamiento en tiempo real de los datos registrados por los sensores de presión.	136

RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño de un sistema electrónico de alerta temprana por variaciones extremas en el nivel del mar, especialmente aquellas que se relacionan con eventos de tipo tsunamigénico en la costa pacífica colombiana, empleando como sitio de aplicación la bahía de Tumaco. Para la fase de sensado del nivel del mar in situ se empleará un sistema de sensado redundante el cual consiste de dos sensores de presión SBE-54 de alta resolución. Estos sensores de presión serán fondeados a una profundidad de 100 metros, instalados a 25 kilómetros de la línea de costa del municipio de Tumaco.

Los datos de presión serán enviados vía inalámbrica a una estación terrestre ubicada en las instalaciones del centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico DIMAR-CCCP, por medio de un radioenlace UHF (Ultra High Frequency) y el sistema de comunicación satelital portátil BGAN de Inmarsat. Estas tecnologías de comunicación en conjunto con un sistema de alimentación fotovoltaico proporcionan un alto grado de estabilidad en la transmisión de datos para sistemas de alerta temprana ya que no requieren de una gran infraestructura física.

La etapa de adquisición, procesamiento y análisis de los datos recibidos se realiza a través de un algoritmo computacional con interfaz de usuario desarrollado con el lenguaje de alto nivel MATLAB, en donde se emplean parámetros de detección de eventos tsunamigénicos previamente determinados por medio del análisis de registros instrumentales obtenidos y mareogramas sintéticos adquiridos como resultado de modelaciones numéricas desarrolladas con el MOST [18], en donde se utilizan parámetros basados en registros históricos de tsunami ocurridos en las poblaciones costeras entre Colombia y Ecuador por efectos sísmicos de la zona de subducción del Pacífico, como es el caso del evento tsunamigénico registrado en 1979 con longitud de fallas comprendidas entre la población de Manta en Ecuador y Buenaventura en Colombia.

GLOSARIO

Amplitud de marea: Es la mitad de la diferencia de altura entre una pleamar y bajamar consecutivas; por lo tanto de mitad del rango de marea.

Angulo de Desplazamiento: En tectónica, ángulo correspondiente a la dirección relativa de desplazamiento del bloque superior respecto del bloque inferior, medido sobre el plano de falla, a partir de la línea de rumbo, en el sentido contrario al de las manecillas del reloj.

Buzamiento: Angulo que mide la inclinación de una estructura o plano, a lo largo de la dirección de máxima pendiente, hacia abajo del plano de falla, medido entre la pendiente máxima y la horizontal; este ángulo se mide por medio de un inclinómetro.

COI: Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO. La COI entrega a los Estados Miembros de las Naciones Unidas un mecanismo esencial para la cooperación mundial en el estudio del océano.

Convección: En general, movimientos de masa dentro de un fluido que resulta en transporte y mezcla de sus propiedades. Es un medio principal de transferencia de energía. En el interior de la Tierra, en particular, movimientos ascendentes del manto producidos por el calor interno del planeta.

Difracción: Curvatura de una onda en un cuerpo de agua alrededor de un obstáculo, por ejemplo, la interrupción de un tren de ondas por un rompeolas u otra barrera.

Dislocación: Desplazamiento entre bloques de una falla, a lo largo del plano de falla, medido en metros.

Epicentro: Punto de la superficie de la tierra localizado directamente sobre el foco o hipocentro de un sismo.

Estación mareográfica: Sitio donde se hacen observaciones de marea

Falla: Fractura en la corteza de la Tierra acompañada por un desplazamiento de un lado de la fractura respecto al otro.

Fosa Marina: Área bien definida de gran profundidad (más de 5500 metros) que suele encontrarse cercana a la costa.

Fosa Tectónica: Depresión del terreno hundida entre dislocaciones laterales.

Hipocentro: Localización calculada del foco de un terremoto.

Intensidad: Medida de los efectos de un terremoto sobre humanos y estructuras, en un lugar particular. La intensidad de un terremoto en un punto no depende sólo de su magnitud sino también de la distancia al epicentro del terremoto, de su profundidad y de la geología local en este punto. Las líneas que unen puntos de igual intensidad se llaman *isosistas*.

ITIC: Centro Internacional de Información de Tsunamis.

Magnitud: Medida de la fuerza o energía liberada por un sismo, la que es determinada instrumentalmente por sismográficos.

Marea: Ascenso y descenso rítmico y alternado de la superficie del océano, y de cuerpos de agua conectados con el océano como los estuarios y golfos. Ocurre dos veces al día en la mayor parte de la Tierra. Es el resultado de la atracción gravitatoria de la luna actuando desigualmente en las diferentes partes de la Tierra en rotación.

Mareógrafo: Dispositivo para medir la altura (ascenso y descenso) de la marea. Especialmente un instrumento que automáticamente hace un registro gráfico y continuo de la altura de la marea en el tiempo.

Ondas Sísmicas: Término general para identificar a todas las ondas elásticas producidas por terremotos o generadas artificialmente por explosiones. Estas incluyen las ondas de cuerpo (P y S) y las ondas superficiales.

Placa Tectónica: Uno de los grandes fragmentos de la corteza terrestre que se desplaza como una unidad rígida en relación a otras.

Propagación de Ondas: Transmisión de ondas a través de un cuerpo.

Refracción: Deflexión de una onda de tsunami durante su propagación, debido a su paso desde una zona a otra de diferente profundidad, lo que cambia su velocidad.

Seiche: Un seiche puede ser generado por una ola constante que oscila en un cuerpo cerrado o semicerrado. Se puede iniciar por ondas sísmicas de largo período (un terremoto), olas de viento o un tsunami.

Sismo precursor: Sismo generador de tsunami.

Subducción: Proceso de descenso de una placa tectónica bajo otra.

Tiempo estimado de arribo: Tiempo de llegada del tsunami a un determinado lugar, calculado en base a la modelación de la velocidad y la refracción de la onda de tsunami que se propaga desde la fuente. La llegada se estima con muy buena precisión (menor que un par de minutos) si la batimetría y la fuente son conocidas

Tsunámetro: Instrumento de medición para la detección temprana y reporte en tiempo real de un tsunami en el océano profundo. También conocido como tsunamímetro.

Tsunamigénico: Que tiene características análogas a las de un tsunami o bien descriptivas de un tsunami.

UNESCO: Organización Educativa, Científica y Cultural de las Naciones Unidas.

INTRODUCCIÓN

Un tsunami es una serie de ondas oceánicas generadas por perturbaciones fuertes y abruptas en el piso oceánico, generalmente terremotos submarinos. Este fenómeno puede llegar a ser devastador a su arribo a la costa debido a la altura y velocidad de la onda generada.

De acuerdo a la distancia medida a partir de la línea de costa, los tsunamis se pueden clasificar como teletsunamis, tsunamis regionales, tsunamis de origen lejano y tsunamis de origen cercano, siendo estos últimos los más peligrosos debido a que el sismo precursor generador se encuentra a una distancia menor a los 200 kilómetros y por tanto el tiempo de llegada de la primera ola a la costa es muy pequeño, lo cual disminuye considerablemente el tiempo de respuesta de la población amenazada.

En Colombia, debido a la convergencia de las placas Nazca y Sudamericana, se genera una zona de subducción ubicada paralela a la costa Pacífica. Al ocurrir un desplazamiento de la corteza oceánica bajo la placa continental, se puede producir un repentino desplazamiento vertical del piso oceánico, en consecuencia, se genera una serie de ondas que se propagan en todas las direcciones a partir de la zona inicialmente deformada, dando origen a un tsunami. Debido a la posición en la que se encuentra la zona de subducción antes mencionada, la costa Pacífica Colombiana se encuentra fuertemente amenazada por posibles eventos tsunamigénicos de origen cercano¹.

Los fenómenos naturales como el que aquí se contempla, de origen geológico y sus efectos conjuntos, representan un peligro latente que bien puede considerarse como una amenaza para el desarrollo social y económico de la región. Por las características propias del fenómeno este evento o suceso ocurre, en la mayoría de los casos, en forma repentina e inesperada, causando la destrucción o pérdida de bienes y/o daños severos sobre el medio ambiente y lo más importante la pérdida de vidas humanas.

¹ GUTIÉRREZ J., 2009. Identificación de escenarios de riesgos por Tsunami para el litoral Pacífico colombiano a partir de la simulación de eventos tsunamigénicos, implementando el sistema de modelación numérica MOST (METHOD OF SPLITTING TSUNAMI).

La ocurrencia de un tsunami genera desorganización de los patrones normales de vida, adversidad, desamparo y sufrimiento en las personas y efectos sobre la estructura socioeconómica².

Debido a la naturaleza de esta falla, se prevé que durante el presente siglo (siglo XXI) ocurran sismos a lo largo de esta zona, por lo tanto existe la amenaza de que ocurra un evento tsunamigénico que afecte considerablemente esta región del país y que se repita una catástrofe de igual o mayor magnitud a las ocurridas anteriormente en esta región o a la producida por el terremoto de Sumatra-Andamán en 2007, el cual devastó las costas del sur de Asia y África Oriental, dejando a su paso aproximadamente unas 232.0000 pérdidas humanas y 2'000.000 de personas desplazadas [27].

La Dirección General Marítima a través del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico DIMAR-CCCP conoce el alto riesgo en el que se encuentra las poblaciones pertenecientes a la costa Pacífica Colombiana y han venido desarrollando investigaciones que le permitan detectar oportunamente posibles eventos tsunamigénicos y emitir alertas tempranas a la población amenazada, logrando hasta el momento la creación del Centro de Alerta Temprana (CAT), en donde es posible la detección de tsunamis de origen lejano empleando herramientas tales como CISON [24] , Siendo aún la detección de tsunamis de origen cercano unas de sus fuertes preocupaciones. En el mercado mundial existen algunos sistemas de detección de tsunamis, ejemplo de ello es el sistema DART desarrollado por la NOAA [17], aunque este sistema resulta ser eficiente para la detección de tsunamis de origen lejano presenta fuertes limitaciones a la hora de detectar tsunamis de origen cercano y además su alto valor adquisitivo lo convierte en una herramienta poco factible.

El objetivo principal que busca lograr el diseño del sistema electrónico de alerta por variaciones extremas en el nivel del mar en la costa Pacífica Colombiana es la detección de posibles eventos tsunamigénicos de origen cercano, debido a su alto índice de ocurrencia y sus resultados devastadores. Para la determinación de los puntos de instalación del sistema de sensado se realizó el estudio de las características batimétricas de la zona, por medio de fuentes de información proporcionadas por el CIOH y el DIMAR-CCCP³.

A través de modelaciones numéricas desarrolladas con el programa MOST[18] se estimó el potencial de detección de dichos puntos por medio de la observación de

² IIDA, K., 1963. Magnitude, energy and generation and mechanisms of tsunamis and a catalog of earthquakes associated with tsunamis. Proc. of the 10th Pacific Science Congress Symposium. International Union of Geodesy and Geophysics U.G.G.I., Monograph 24.

³ Reyna J., 1997. Simulación numérica de un Tsunami de origen lejano en su Aproximación a la costa Pacífica colombiana. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Escuela de Oceanografía Física.

mareogramas sintéticos donde es posible conocer las características de generación, propagación, inundación y tiempo de arribo de la primera ola de tsunami, siendo este último dato relevante para el diseño total del sistema.

Para el sistema de sensado se emplearán dos sensores de presión de alta resolución por cada uno de los puntos de instalación del sistema alerta temprana, generando redundancia que ayuda a detectar posibles errores en los datos registrados, producidos por posibles fallas de operación en alguno de los sensores. Estos sensores serán instalados directamente debajo de una boya que cuenta con un alto nivel de impermeabilidad al agua de mar y proporciona las condiciones necesarias para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos electrónicos que ahí serán instalados, y que permitirán la adquisición y la transmisión inalámbrica de los datos registrados por los sensores en tiempo cuasi real.

La tecnología de comunicación que empleará el sistema, es la radiofrecuencia en la banda de los 902 a 928 MHz y la comunicación vía satelital por medio del sistema portátil BGAN de Inmarsat [28], transmitiendo los datos de forma simultánea por los dos medios, convirtiéndose de esta forma en un sistema redundante en comunicación, siguiendo los lineamientos determinados por la lista de comprobación de sistemas de alerta temprana desarrollada en el año 2008 por la UNESCO.

Con ayuda del lenguaje de alto nivel MATLAB se realiza el procesamiento y análisis de los datos registrados por los sensores, por medio de un algoritmo computacional con interfaz gráfica de usuario en donde el programa desarrollado muestra el comportamiento de la marea, el estado de las baterías del sistema de alimentación fotovoltaico la cual suministra alimentación a los equipos instalados en la boya, la posición en la que se encuentra la boya y se encarga de discernir la posible presencia de eventos tsunamigénicos en la zona de estudio comparando el nivel de marea observado en tiempo real con un umbral de detección previamente estructurado como producto del análisis de registros instrumentales obtenidos previamente y mareogramas sintéticos de señales tsunamigénicas como resultado de modelaciones numéricas realizadas con el MOST en el punto de instalación del sistema de sensado previamente determinado.

El problema

Descripción del problema. Históricamente el municipio de San Andrés de Tumaco ha mantenido una continuidad sísmica regular debido a la zona de subducción ubicada paralelamente a la costa pacífica lo que ha provocado dos grandes desastres naturales que han desencadenado en tsunamis originados por sismos en 1906 y 1979. El crecimiento demográfico en esta región del país es bastante notable, de esta forma sería incalculable el desastre que podría ocasionar en pérdidas humanas y materiales un evento de esta naturaleza, por

esta razón es de vital importancia disponer de mecanismos que sirvan de soporte para enfrentar este tipo de amenazas.

Actualmente este municipio no cuenta con equipos electrónicos eficientes de detección temprana de variaciones extremas en el nivel del mar, capaz de suministrar una señal de alerta a los habitantes que les informe evacuar oportunamente la zona en riesgo.

Cabe resaltar que en el mercado internacional existen dispositivos electrónicos similares que pueden ser adaptados con el fin de cumplir funciones de monitoréo de la dinámica oceánica, lamentablemente el costo comercial de dichos equipos es bastante elevado y el poder adquisitivo de las entidades encargadas de la prevención de riesgos por presencia de tsunami en Tumaco es bastante bajo.

Por los motivos anteriormente expuestos se propone diseñar e implementar un sistema electrónico que permita la detección temprana de tsunamis de forma eficaz, empleando dispositivos económicos presentes en el mercado nacional.

Formulación del problema. ¿Es posible con la actual tecnología diseñar un sistema electrónico de alerta temprana que alerte de forma oportuna sobre las variaciones extremas en el nivel del mar que puedan ser desencadenadoras de tsunami en la costa pacífica colombiana?

Alcance y delimitación

La pasantía se desarrollará en el Área de Manejo Integrado de Zona Costera dependencia de la Dirección General Marítima – DIMAR-CCCP, el cual se encuentra ubicado en San Andrés de Tumaco.

Las funciones a realizar en esta entidad se encuentran relacionadas con el diseño e implementación de un sistema electrónico capaz de captar variaciones extremas en el nivel del mar en Tumaco. Este sistema electrónico estará compuesto por diferentes etapas, las cuales inician a partir del diseño y construcción de un sistema electrónico encargado de sensor las variaciones extremas en el nivel del mar, hasta la fase final en donde se indicarán dichos comportamientos por medio de una interfaz gráfica, en la cual el usuario podrá observar los parámetros más relevantes de la dinámica oceánica, a la vez que realiza las funciones de monitorización, ya que el sistema electrónico será capaz de proporcionar señales de alarma cuando exista un patrón inusual predeterminado en la marea y alertará al personal responsable de la prevención de este tipo de riesgo en la entidad.

Objetivos

Objetivo general. Diseñar e implementar un sistema electrónico de alerta temprana por variación extrema en el nivel del mar en San Andrés de Tumaco.

Objetivos específicos:

- Diseñar un sistema de comunicación inalámbrica de largo alcance capaz de transmitir datos a distancias superiores a diez kilómetros.
- Diseñar un sistema de adquisición de datos capaz de capturar la información proveniente de los mareógrafos en cortos periodos de tiempo.
- Implementar un algoritmo computacional que analice los datos obtenidos provenientes de mareógrafos y genere una señal de alarma en caso de ser detectadas variaciones extremas en el nivel mar.
- Desarrollar un software con interfaz gráfica de usuario capaz de procesar los datos provenientes de la etapa de adquisición y además pueda suministrar oportunamente información del comportamiento de la marea de forma clara y eficaz.

Justificación

Las costas del Océano Pacífico se encuentran con un grado significativo de exposición frente a un fenómeno natural tsunami, esto debido a que cerca del litoral se encuentra la zona de subducción del Pacífico, donde colisionan las placas tectónicas Nazca y Suramérica. La cuál hace parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, que es la zona sísmica más activa del planeta.

Durante los últimos años, la franja sísmica Colombo- Ecuatoriana ha presentado una alta actividad sísmica, llevando a que se realicen numerosos estudios en sismología en este sector.

Los municipios del litoral sur del Pacífico, principalmente en los departamentos de Nariño, Cauca y Valle del Cauca, se encuentran en mayor grado de vulnerabilidad, siendo de todas las poblaciones el municipio de Tumaco el de mayor riesgo por su alta concentración de población y el tipo de construcciones presentes en gran parte del municipio, su directa exposición a un tsunami y su bajo relieve.

En el siglo pasado 4 sismos de considerable magnitud afectaron Tumaco, siendo generadores de tsunamis los de 1906, en el que se borro del mapa a la población de Tumaco de ese entonces, y el de 1979, el cuál fue contenido en gran medida por los depósitos sedimentarios que conformaban la isla El Guano, y aún así borro del mapa la población de San Juan de la Costa, estimándose unas 500 personas fallecidas y 3000 viviendas afectadas a lo largo de estos 4 acontecimientos.

Por tal razón, es de mucha utilidad implementar sistemas de detección de tsunamis a lo largo de la costa pacífica, que pueda ser adquirido para cualquier población aledaña a las costas y que ayude a evitar la pérdida de vidas en los lugares que puedan ser afectados por este fenómeno.

Antecedentes

A nivel mundial, la National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, ha generado un sistemas de detección de tsunamis, denominado DART (Deep Ocean and Reporting of Tsunamis), que consiste en un sensor instalado en el piso oceánico y de una boya de superficie para comunicación en tiempo real. El sensor es un registrador de la presión de la columna de agua que va acoplado a un transmisor acústico. Su capacidad de detección permite medir tsunamis de amplitudes de 1 centímetro en profundidades de hasta 6000 metros. Un enlace acústico une al sensor de fondo con la boya de la superficie. Los datos recibidos en la boya son retransmitidos vía satélite GOES a las estaciones de tierra donde son analizados.

Así mismo, teniendo en cuenta que México es también una región altamente vulnerable a este tipo de eventos, se han propuesto implementar sistemas de detección de tsunamis de bajo costo, siendo sistema y algoritmos diseñados por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, pero los componentes se suplen por marcas comerciales, para así obtener un bajo costo de los mismos. Desde octubre de 2004, el CICESE mantiene y opera en el puerto de El Sauzal, un sensor de nivel de mar de alta frecuencia, transmitiendo en tiempo real por Internet un dato de nivel del mar cada minuto. Se programa instalar una red de estos sensores en otros puertos del pacífico mexicano, para integrar el futuro sistema de alerta temprana para tsunamis de México.

Teniendo en cuenta la necesidad de implementar el Centro de Alerta de Tsunami (CAT) del CCCP en Tumaco, y de buscar los mecanismos que permitan proveer información oportuna y de calidad para generar reportes que permitan dar aviso acerca de algún suceso que pueda desencadenar un evento de sismo-tsunami, se ha desarrollado, un sistema prototipo para la adquisición y análisis del comportamiento de la marea en tiempo real, desarrollo que se ha dado con la ayuda de el programa de ingeniería electrónica de la Universidad de Antioquia. El prototipo desarrollado anteriormente contempla el sensor de presión SBE 50, el cual, a través de un cable de comunicación RS-232, que es conectado a un modem de radio frecuencia y envía información en tiempo real al Centro de Alerta de Tsunami, ubicado en el CCCP, y, a través de un software desarrollado hace una comparación de los datos obtenidos por el sensor, con los pronosticados por el IDEAM, emitiendo alertas en caso de detectar cambios del nivel del mar que puedan ser catalogados como olas tsunamis.

1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA ENLINEA LTDA.

¿QUIENES SOMOS?

La Dirección General Marítima (DIMAR) fundó el Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP), trabajando con gran esfuerzo en su construcción durante 1982 y 1983, entregando su obra el primero de febrero de 1984 en San Andrés de Tumaco⁴.

Desde el año 2000 enfoca su Agenda Científica hacia el tema de riesgos ambientales marinos, concentrando sus programas y proyectos de estudio en las tres áreas de investigación que básicamente operan en los temas de Protección del Medio Marino con énfasis en Hidrocarburos y Calidad de Aguas, Modelado Integral de Zonas Costeras con énfasis en Riesgos Ambientales Marinos, y Oceanografía Operacional con énfasis en descriptiva.

Para diciembre de 2008 la Comisión Colombiana del Océano (CCO), en cabeza del Vicepresidente de la República, Dr. Francisco Santos Calderón, consideró que la Autoridad Marítima Nacional era la entidad idónea para desarrollar e implementar un Centro de Alerta de Tsunami (CAT), por ello, en marzo de 2009 el personal científico del CCCP creó el CAT-DIMAR a partir de los parámetros que la comunidad nacional, regional e internacional exigía de acuerdo a los estándares actuales. En los últimos años, el CCCP ha continuado su labor científica con énfasis en la ejecución de proyectos de investigación en dinámica oceanográfica, calidad de aguas, la elaboración de pronósticos meteomarineros y la entrega de herramientas para la toma de decisiones por parte de las autoridades locales y nacionales ante amenazas de origen marino⁵.

Misión. La Dirección General Marítima, es la Autoridad Marítima Nacional que ejecuta la política del gobierno en materia marítima y tiene por objeto la dirección, coordinación y control de las actividades marítimas en los términos que señala el Decreto Ley 2324 de 1984 y los reglamentos que se expiden para su cumplimiento, promoción y estímulo del desarrollo marítimo del país.

Visión. Ser una Entidad comprometida con el desarrollo del poder marítimo nacional, proyectándose en una Autoridad Marítima influyente en el ámbito nacional e internacional, centrada en mejorar la seguridad marítima y, a través de la coordinación y facilitación, propender por alcanzar los intereses marítimos.

⁴ Intergovernmental Oceanographic Commission UNESCO 2008. Glosario de Tsunamis.

⁵ KENJI Satake, 2004. The 2004.Tsunamis: Case Studies and Recent Developments, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

2. METODOLOGIA

A continuación se describen las actividades desarrolladas en cada una de las etapas de la ejecución del diseño del sistema electrónico de alerta temprana proyecto.

2.1 ESTUDIO DE LA DOCUMENTACIÓN TEÓRICA EXISTENTE Y DE LAS ESPECIFICACIONES TECNICAS Y REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.

2.1.1 Teoría general de mareas. La marea se define como el ascenso y descenso periódico del nivel del mar con respecto a la tierra, y es producida por la atracción gravitacional de la Luna y del Sol; así como también por factores no astronómicos como línea costera, profundidad local, relieve oceanográfico y otras influencias hidrográficas y meteorológicas que cumplen un rol importante en su comportamiento, de esta forma la mareas se encuentran conformadas por dos tipos de mareas, la marea astronómica y la marea meteorológica.

2.1.1.1 Marea astronómica. La marea astronómica se define como el conjunto de movimientos regulares de ascenso y descenso del nivel del mar con periodos próximos a las 12 o 24 horas que se producen por los efectos gravitacionales del sistema tierra-luna-sol. Desde el punto de vista práctico, es necesario conocer el comportamiento de la onda de marea, especialmente para predecir la amplitud de la misma en un instante y lugar determinados. Es por ello que una forma para abordar el estudio de su comportamiento consiste en considerar la marea astronómica como la suma de un número finito de ondas, cuya amplitud y fase son con ocidas debido a que se han asociado con algunos movimientos planetarios.

De acuerdo con la hipótesis anterior, varios investigadores han trabajado en el desarrollo de componentes periódicas de la fuerza tractora como forzamiento generador de la marea. Darwin y Doodson consiguieron llevar a efecto esta descomposición realizando un análisis astronómico teniendo en cuenta los movimientos de la Tierra, Luna y Sol, a partir del cual determinaron la frecuencia e importancia relativa de cada una de las componentes.

La descomposición se realiza básicamente asumiendo que las fuerzas generadoras producidas por la Luna y el Sol en sus trayectorias variables, son generadas por un número finito de planetas ficticios. Cada uno de estos planetas gira alrededor de la tierra con una órbita circular situada en el plano del Ecuador y a una velocidad

angular constante, y se seleccionan de tal modo que, uno o la combinación de varios de ellos, reproduzcan la frecuencia de una determinada perturbación astronómica.

La descripción y predicción de la marea en una localización dada, puede hacerse mediante lo que se denomina análisis armónico de mareas, el cual consiste en descomponer los registros de nivel del mar en un número finito de ondas cuyo período y fase han sido perfectamente establecidos, dado que coinciden con los períodos de algunos de los movimientos astronómicos relativos entre la Tierra, la Luna y el Sol.

En líneas generales el método del análisis armónico consiste en obtener, a partir de un registro horario de datos del nivel del mar, las amplitudes y fases de las ondas componentes. A estos parámetros se les llama componentes armónicas, debido a la suposición implícita de que las respuestas de mares y océanos a las fuerzas de marea no cambian en el tiempo. En este caso el método que se va a presentar es el elaborado por Dronkers (1964) y basado en los mínimos cuadrados.

La marea astronómica se aproxima, entonces, a la suma de esas ondas constituyentes de la siguiente manera:

$$S_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

Donde:

- a_0 es la amplitud del nivel medio de referencia
- a_i es la amplitud de la onda i
- ω_i es la frecuencia de la onda componente i
- φ_i es el desfase de la onda componente i
- t es el instante en que se calcula la marea
- n es el número de componentes consideradas

Este método trata de ajustar esa sumatoria de constituyentes, que representa la marea astronómica, a los datos horarios del nivel del mar, minimizando el cuadrado de la diferencia entre ambas series.

Componentes armónicos de las mareas. Debido a estas teorías los investigadores trabajaron en el desarrollo de componentes periódicas de la fuerza gravitacional como forzamiento generador de las mareas. Este descubrimiento fue realizado por Darwin y Doodson. Los cuales realizaron un análisis astronómico teniendo en cuenta los movimientos.

De la tierra el sol y la luna a partir de la cual se determinó la frecuencia e importancia relativa de cada una de las componentes, siendo la de mayor importancia, las componentes M_2 que es la componente lunar principal y S_2 la componente solar principal. (ver tabla 1)

Tabla 1. Principales componentes maréales de origen astronómico

Nombre	Símbolo	Período	Coef.
Lunar principal	M_2	12.42	100
Solar principal	S_2	12.00	46.6
Elíptico Lunar mayor	N_2	12.66	19.2
Semidiurno Luni-Solar	K_2	11.97	12.7
Solar elíptico mayor	T_2	12.01	2.7
Solar elíptico menor	L_2	12.19	2.8
Elíptico lunar 2º orden	$2N_2$	12.91	2.5
Diurno Luni-Solar	K_1	23.93	58.4
Diurno Lunar principal	O_1	25.82	41.5
Diurno Solar principal	P_1	24.07	19.4
Elíptico Lunar mayor	Q_1	26.87	7.9
Elíptico Lunar menor	M_1	24.84	3.3
Quincenal Lunar	M_f	327.9	17.2
Mensual Lunar	M_m	661.3	9.1
Semi-anual Solar	S_{sa}	4383	8.0

2.1.1.2 Marea meteorológica. La marea meteorológica se define como la respuesta del nivel del mar a las tensiones tangenciales inducidas por el viento y los campos de presiones. La marea meteorológica se puede representar a través del residuo meteorológico que se obtiene tras la realización del análisis armónico a una serie de nivel del mar. Dicho residuo tiene carácter aleatorio y su régimen medio sigue una distribución aproximadamente normal, (GIOC, 2002b)⁶.

La acción continuada del viento puede provocar el arrastre de la lámina de agua hasta que se alcanza un equilibrio entre la presión ejercida por la variación de nivel y la tensión ejercida en superficie. Este arrastre produce al ascenso del nivel y depende de varios factores: intensidad, persistencia y dirección del viento, batimetría y rugosidad del fondo.

⁶ CARDONA Y., 2004. Modelación de tsunamis en la Costa Pacífica colombiana, caso de aplicación bahía de Tumaco, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos.

2.1.1.3 Tipos de mareas. Existen cuatro tipos de mareas principales, la marea semidiurna, la marea semidiurna mixta, la marea diurna y las mareas diurnas mixtas, aunque existen otros, llamados anómalos los cuales son: semidiurnos solares, semidiurnos paralácticos, semidiurnos de aguas someras, semidiurnos dobles (de $\frac{1}{4}$ del día) y el Bor, el cual se presenta en los deltas de los ríos y se considera como una deformación de las mareas debido a la influencia de las condiciones físico-geográficas locales.

Mareas semidiurnas: Se caracterizan por dos mareas altas y dos mareas bajas durante el día lunar, por eso el periodo es igual a la mitad del día lunar (12 h 25 m). Las alturas de las mareas altas y bajas siguientes tienen muy poca diferencia, debido a que la marea semidiurna se superpone a la marea diurna.

Presentan diferentes oscilaciones durante el mes, las cuales dependen de las fases de la luna. Las mareas altas se observan después de la luna llena y luna nueva, lo cual corresponde a la marea de sicigia. Luego de la sicigia, el valor de la marea disminuye y cuando la luna pasa al primer $\frac{1}{4}$ o al último $\frac{1}{4}$, la marea será mínima, a esto se le llama marea de cuadratura.

Mareas semidiurnas mixtas: Tienen en general un carácter semidiurno. Durante el mes lunar conservan dos mareas altas y dos mareas bajas en el día lunar. Ante una mayor declinación de la luna se observan significativas desigualdades diurnas, las segundas mareas altas y bajas pueden expresarse débilmente. Ante una declinación nula de la luna las mareas tienen un carácter similar al de las mareas regulares diurnas.

Mareas diurnas mixtas: Se caracterizan por la predominancia durante el mes lunar de las mareas diurnas con una marea alta y una marea baja en el día lunar (24 horas 50 minutos). Pero cuando la declinación lunar es cercana a cero, se observan dos mareas altas y dos mareas bajas en el día lunar. Las desigualdades semi mensuales están relacionadas con la declinación lunar. Ante una declinación máxima de la luna el valor de la marea es máximo (pleamar) y tiene un carácter de marea diurna. Con una declinación lunar mínima el valor de la marea disminuye y aparecen las segundas mareas altas y bajas. El valor de la marea entonces es mínimo. Los cambios de las fases de la luna prácticamente no se notan en el valor de la marea.

Mareas diurnas: Se caracterizan por tener una marea alta y una marea baja durante el día lunar. Las desigualdades de las mareas están relacionadas con la declinación lunar. Ante una declinación máxima de la luna, el valor de la marea es máxima (pleamar). Pero la marea máxima empieza no en el momento de la declinación máxima de la luna, sino después de un tiempo (edad de la marea diurna). Cuando la declinación lunar es igual a cero, el valor de la marea es mínima (bajamar).

2.1.1.4 Medidores del nivel del mar. En la actualidad es posible encontrar diversos sistemas y dispositivos que nos permiten la monitorización de las diferentes características propias del océano, como la salinidad, la temperatura, la turbidez, entre otras.

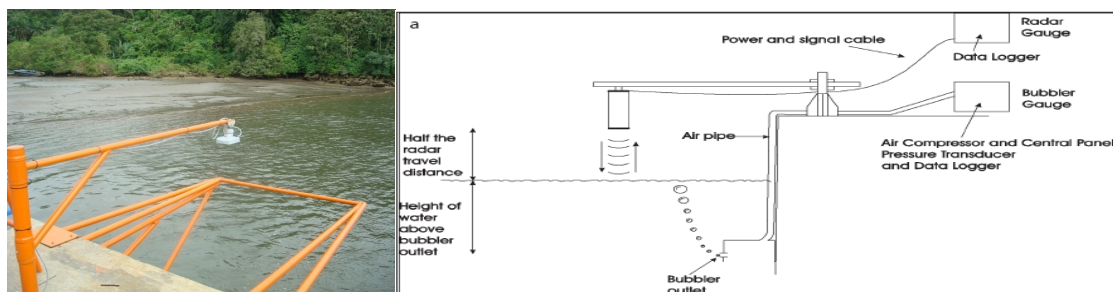
Debido a la presencia cada vez más nefasta, de fenómenos naturales como lo son los tsunamis y el fenómeno del Niño/Niña, se ha hecho indispensable la adopción de sistemas de medida del nivel del mar que realicen de forma automática una monitorización constante (7/24) de la dinámica oceánica que permitan detectar posibles anomalías en la misma.

En la actualidad existen diferentes tecnologías que permiten detectar los niveles de marea, desde sistemas sofisticados de altimetría satelital, hasta medidores más elementales como los de funcionamiento mecánico (*Stilling well*) [39]. Los dispositivos comúnmente empleados en sistemas de monitorización son cuatro; los medidores de radar, los sensores de presión, los mareógrafos acústicos, y los de tipo mecánico. Los dos primeros dispositivos son los más empleados al interior de la DIMAR-CCCP para la monitorización del comportamiento oceánico y de los cuales se habla a continuación.

Medidores de radar: Los sensores de tipo radar han venido reemplazando sistemas con tecnologías antiguas instalados en diferentes agencias meteorológicas a nivel mundial. Esto se debe a que éstos son mucho más fáciles de operar y su mantenimiento es más práctico en comparación con otros sistemas de monitorización, como por ejemplo los sistemas acústicos. Su costo comercial es relativamente bajo y la instalación del sistema no requiere de mayor trabajo ingenieril.

Estos instrumentos son suministrados con el hardware y software necesario para la conversión de las medidas del radar a niveles de altura del nivel del mar.

Medidor de tipo radar instalado en el muelle de Guardacostas de la unidad naval de la DIMAR en Tumaco y su correspondiente diagrama pictórico.



Sensores medidores de presión: estos dispositivos relativamente son poco costoso, emplean piezas en cerámica, donde los cambios en la presión del agua causan cambios en la resistencia o capacitancia en el elemento de presión. En la actualidad se emplean sensores de presión donde los cambios son detectados por elementos de cuarzo, en la cual la frecuencia de resonancia varía con la *strain* aplicada a ésta.

La frecuencia obtenida es normalmente proporcional a los niveles de presión, donde finalmente es transmitida al dispositivo de control donde se realiza la conversión a unidades de tipo físico y puede ser mostrada y almacenada en data logger.

Maniobra de fondeo del sensor de presión marca *SBE-50* en uno de los pilotes del muelle de Guardacostas de la Base Naval del Morro en Tumaco y su diagrama pictórico de instalación. (ver tabla 2)

Tabla 2. Principales características generales de los medidores del nivel del mar tipo radar y sensor de presión

Parámetro	Sensor de radar	Sensor de presión
Operación	Mide el tiempo de viaje de un pulso de radar o los cambios de fase entre una onda transmitida y la onda recibida para determinar la distancia a la que se encuentra la superficie del mar.	Emplean cambios en los niveles de capacitancia o frecuencia de resonancia debido a los dispositivos de cuarzo o de cerámica.
Requerimientos de instalación	Requiere de una estructura rígida para la posición sobre el nivel del mar, con suficiente claridad para evitar reflexiones ruidosas de estructuras adyacentes. Requiere de equipos de registro, comunicación y fuente de alimentación.	Puede ser instalado prácticamente en cualquier lugar, generalmente son instalados al interior de tubos, pero pueden ser instalados en el piso oceánico de forma directa. Tienen bajo consumo de potencia, Requiere de equipos de registro, comunicación.
Exactitud	Exactitud aproximada de 1 centímetro del nivel del mar	La resolución típica es de 1 milímetro del nivel del mar.

2.1.1.5 Análisis de mareas en términos frecuencia- tiempo. El objetivo del análisis de una señal es el de disponer de una transformación que represente la señal en el campo de las frecuencias y en el del tiempo, simultáneamente. El análisis estándar de Fourier descompone una señal en las componentes de frecuencias y determina la potencia relativa de cada una.

Este procedimiento no brinda información acerca de cuándo la señal exhibe una característica particular y por lo tanto en aquellos casos donde la señal no es estacionaria se pierde información valiosa al ignorar las anomalías locales.

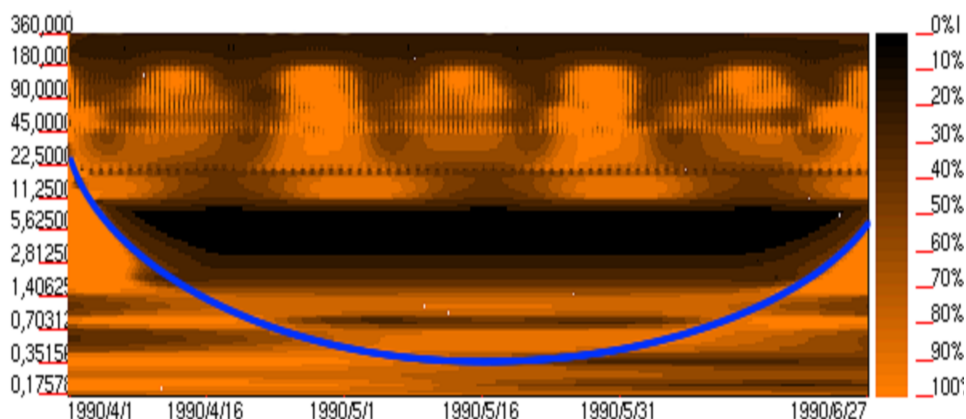
En el caso del estudio de las mareas, debido a su origen astronómico, la señal es estacionaria, con algunas perturbaciones producidas por eventos no estacionales o atmosféricos tales como la acción del viento. Al permitirse un análisis que pueda distinguir, en el dominio del tiempo, las anomalías en las frecuencias de la señal, se evita incluir en el modelo las componentes no astronómicas.

2.1.2.1 Transformada de Wavelet. Para resolver la deficiencia presentada por la transformada de Fourier, Gabor [Gabor, 1946] introduce la transformada por ventanas “windowed, short-time Fourier Transform.” (STFT), en la cual se traslada en el tiempo una ventana de duración fija y extrae las frecuencias contenidas para cada intervalo.

Este procedimiento es apropiado para series de tiempo que son estacionarias localmente, pero que globalmente no lo son. Como cada ventana tiene una escala fija, se presentan los siguientes problemas al usar dicho procedimiento:

Si los detalles (anomalías) son muy pequeños con respecto al ancho de la ventana, se tendrá un problema similar al presentado en la transformada estándar de Fourier, es decir, los detalles se detectarán pero no tendrán localización adecuada en el espacio temporal. Si los detalles en la señal son mayores que el ancho de la ventana, estos no serán detectados apropiadamente. (ver figura 1)

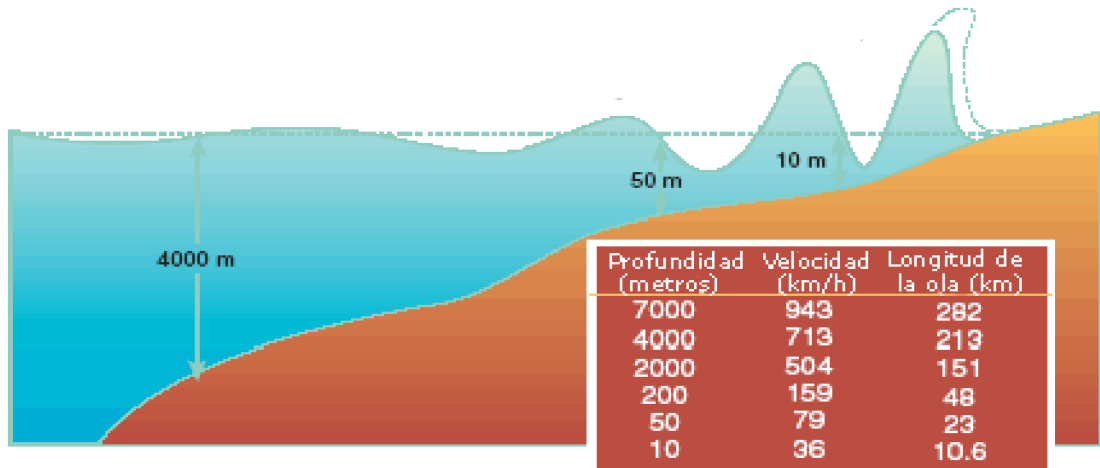
Figura 1. Representación tiempo versus frecuencia como resultado de la aplicación de la transformada de Wavelets.



Esta gráfica tiene el tiempo en el eje de las abscisas y las frecuencias en las ordenadas. La escala de colores, indica el porcentaje de representatividad que tiene una frecuencia en cada tiempo; los valores más altos muestran que la frecuencia tiene mayor relevancia en la serie. Existe una zona denominada cono de influencia (la cual se encuentra por debajo de la línea azul) en la cual la TW no brinda información fiable.

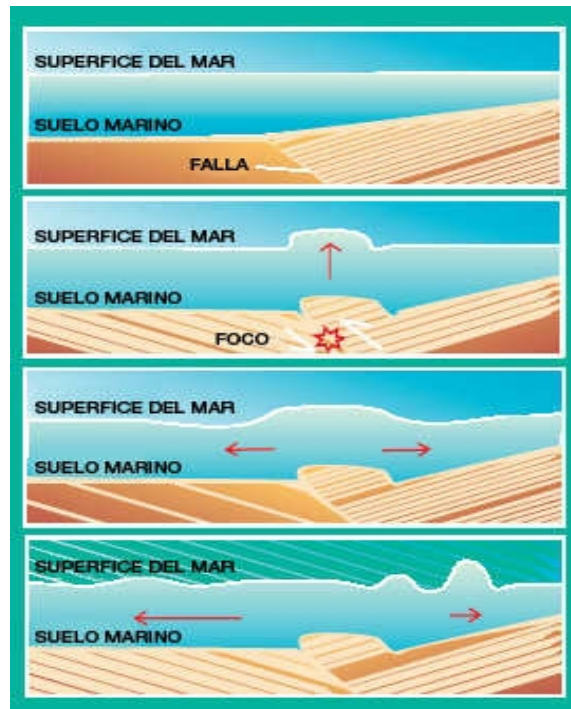
2.1.2 Tsunamis. La palabra Tsunami es un término japonés que se deriva en dos palabras, “*tsu*” que significa puerto y “*nami*” que significa ola, su traducción al español sería ola en puertos. Tal como su nombre lo dice este es un fenómeno natural que se manifiesta y registra en las costas, consiste en una serie de ondas oceánicas extremadamente largas, generadas por perturbaciones a gran escala de la superficie libre o en el lecho del mar. Estas ondas se propagan en todas las direcciones desde el lugar de generación hasta su arribo a la costa. (ver figura 2)

Figura 2. Onda tsunami y su Comportamiento de la ola a su arribo a la costa.



2.1.2.1 Generación, propagación y llegada a la costa de un tsunami. Las perturbaciones que producen ondas tsunami son asociadas principalmente a sismos que ocurren bajo o cerca del piso oceánico, menos comúnmente por derrumbes submarinos, desprendimiento de glaciares, erupciones volcánicas submarinas, flujos de corrientes de turbidez o de lava, caída de meteoritos y explosiones nucleares en el lecho marino, siendo los sismos los responsables del 90% de los tsunamis reportados durante 1790-1990. Varios autores señalan que los grandes tsunamis son generados por terremotos con hipocentros poco profundos y con un movimiento vertical del fondo tipo pistón, provocado por el desplazamiento de fallas normales e inversas. (ver figura 3)

Figura 3. Etapas de generación de un tsunami debido a un sismo producido en una zona de subducción.



Las olas tsunami no solo se desplazan a altas velocidades, si no que mantienen su altura de marea, o amplitud, a lo largo de grandes distancias. La amplitud decae a medida que éstas se propagan por tres razones: las olas se expanden a lo largo de la superficie de agua, las olas se dispersan porque las componentes con longitudes de onda más grandes viajan más rápido y la energía es atenuada por el amortiguamiento viscoso del agua. Según la distancia entre la fuente y la zona afectada, los tsunamis se clasifican así:

Tsunami local o de origen cercano: Generado por una fuente, normalmente un sismo, ubicada a no más de 200 Km. de la costa afectada, y en algunas ocasiones generado por un derrumbamiento o flujos piroplásticos. El tiempo de arribo de las ondas de este tipo de tsunami es inferior a una hora.

Tsunami regional: Tsunami capaz de ejercer destrucción en una región geográfica particular ubicada hasta a 100 Km. de su fuente, aunque también puede ocasionar algunos efectos menores a mayores distancias.

Teletsunamis o Tsunami distante: Tsunami originado por una fuente distante, generalmente ubicada a más de 1000 Km. de la costa.

Tsunami Pacific-wide: Tsunami capaz de ocasionar una amplia destrucción, no solo en la región inmediata de su generación, sino también en todo el Océano Pacífico.

2.1.2.2 Antecedentes de tsunami. Los tsunamis constituyen uno de los fenómenos naturales de mayor relevancia en el mundo por sus características desastrosas, afectando a la mayoría de los países costeros, especialmente en el Océano Pacífico.

De acuerdo a estadísticas, de los aproximadamente 420 tsunamis acaecidos en el siglo XX, el 20 % causaron daños de consideración en las zonas costeras cercanas a su origen y el 15% de éstos también causaron daños en zonas costeras lejanas.

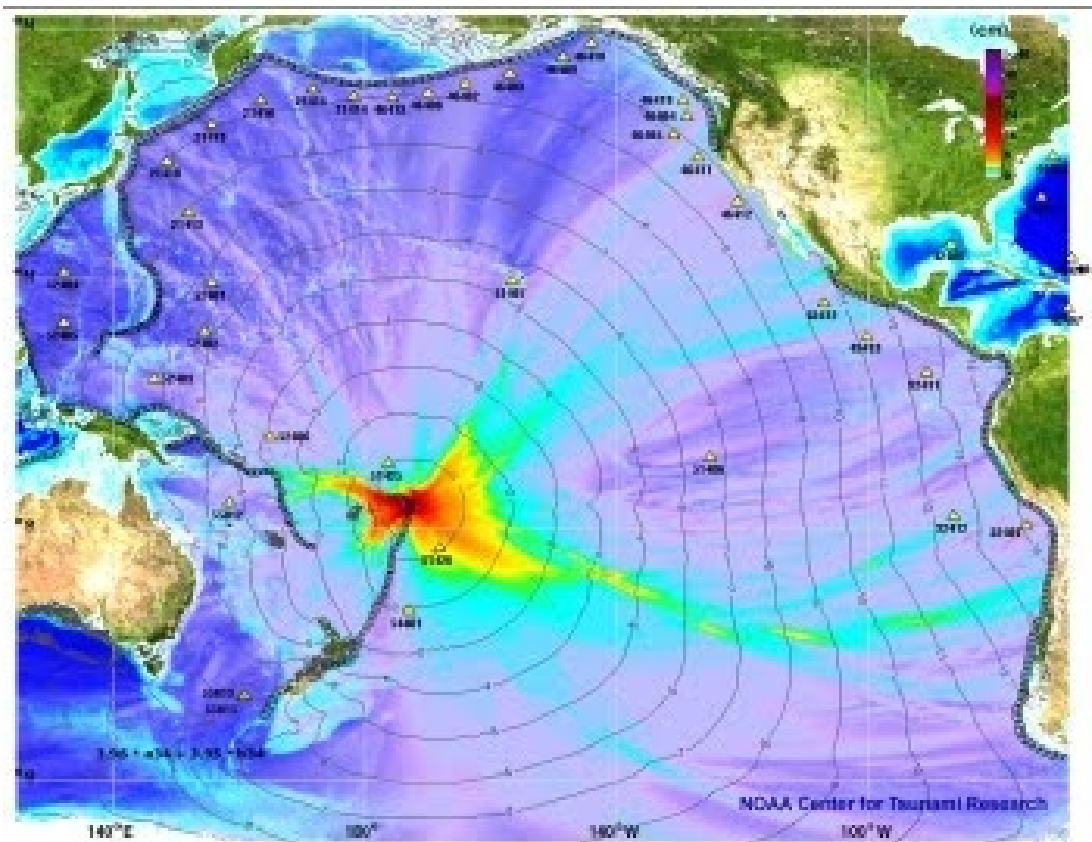
En los últimos años hemos sido testigos de dos grandes tsunami originados en el océano pacífico, el primero de ellos es el tsunami ocurrido en el 2004 originado por el terremoto de Sumatra-Andamán de magnitud de 9.0 a 9.3 Mw. una profundidad de 30 kilómetros, la ola originada llego a la costa después de 15 minutos de originado el sismo con alturas desde 5 hasta 30 metros, lo que originó la devastación de las costas del sur de Asia y África Oriental, dejando a su paso aproximadamente unas 232.0000 pérdidas humanas y 2'000.000 de personas desplazadas (Bunting *et al*, 2006).

El número de víctimas en Indonesia fue el más grande con 160.000, seguida de Sri Lanka con 35.000, India con 16.000 y Tailandia con 8.300.

El segundo tsunami fue causado por un sismo cuyo epicentro tuvo lugar a unos 204 kilómetros al suroeste de Samoa, con una magnitud de 8.3 Mw. y a 18 kilómetros de profundidad, el tsunami provoco olas de hasta seis metros de altura que invadieron cientos de metros de tierra destruyeron también varios complejos turísticos y arrastraron personas y vehículos mar adentro.

La vecina Samoa Estadounidense perdieron la vida otras 19 personas, en tanto que en Tonga, otra isla de la zona, murieron otras diez. La costa sur de la principal isla de Samoa, Upolu, quedó completamente devastada. (ver figura 4)

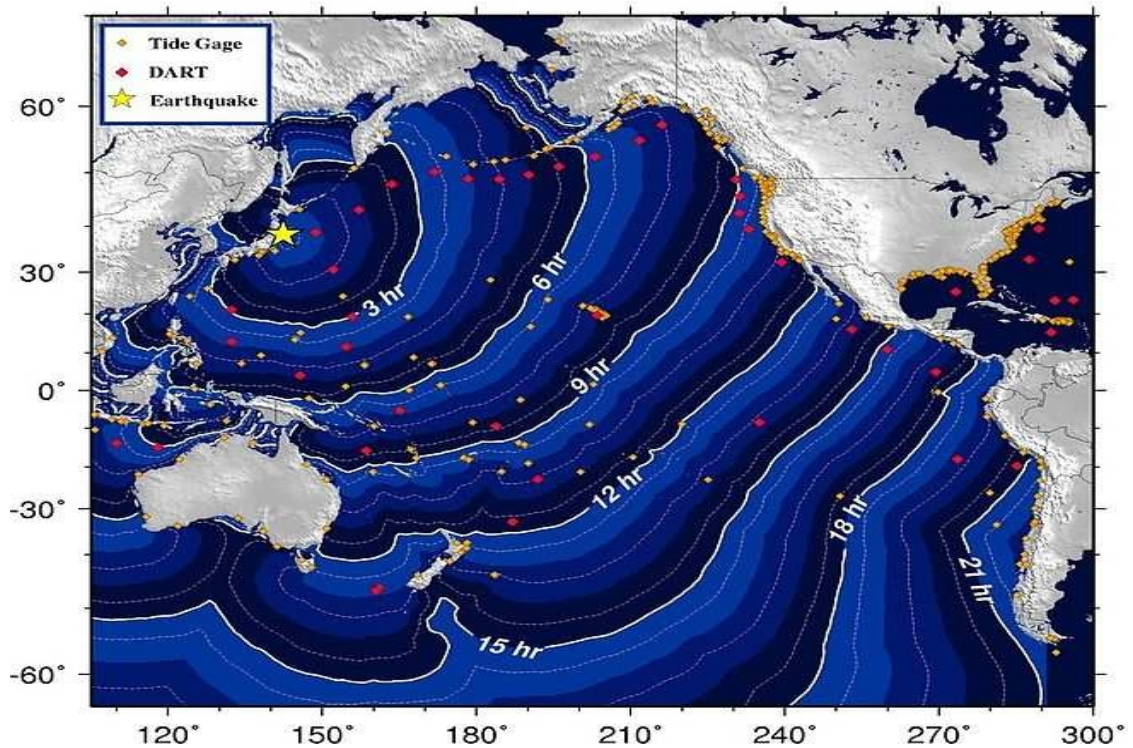
Figura 4. Alcance y hora de llegada de la ola tsunami.



El más reciente tsunami ocurrido en el presente siglo fue el producido en Japón el 11 de marzo de 2011. Este terremoto y tsunami denominado oficialmente por la Agencia Meteorológica de Japón como el terremoto de la costa Pacífico de la región de Toku, fue un terremoto de magnitud 9,0 M_W que creó olas de maremoto de hasta 10 metros. El terremoto ocurrió a las 14:46:23 hora local (05:46:23 UTC).

El epicentro del terremoto se ubicó en el mar, frente a la costa de Honshu, 130 km al este de Sendai, en la prefectura de Miyagi, Japón. El terremoto duró aproximadamente dos minutos según expertos. El Servicio Geológico de Estados Unidos explicó que el terremoto ocurrió a causa de un desplazamiento en proximidades de la zona de la interface entre placas de subducción entre la placa del Pacífico y la placa Norteamericana. (ver figura 5)

Figura 5. Alcance y hora de llegada de la ola tsunami producida en Japón 2011.



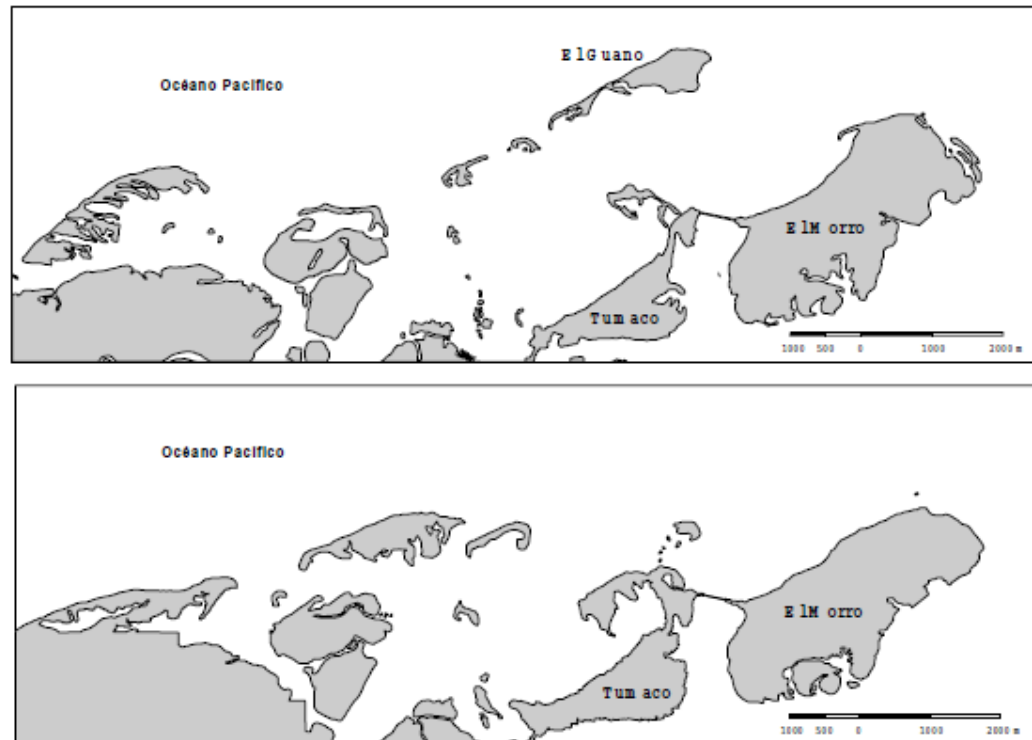
A lo largo del siglo pasado, el litoral pacífico colombiano sufrió el embate de cuatro tsunamis (1906, 1942, 1948, 1979) generados por cuatro sismos de origen cercano, los cuales afectaron significativamente a la población asentada principalmente en la costa sur de Colombia, dejando un saldo de miles de pérdidas humanas e innumerables daños materiales.

El Bloque Norte de los Andes, es una región de intensa actividad sísmológica, en particular, la franja sísmica ubicada frente a litoral pacífico sur de Colombia y norte de Ecuador. En esta zona, durante el pasado siglo XX, se produjeron. El más grande, el 31 de enero de 1906 con $M_w > 8.8$, tuvo una longitud de ruptura estimada de 500 km y el 12 de diciembre de 1979 con $M_s > 7.7$ [8].

Parte de la línea de costa de Colombia fue barrida por un tsunami que destruyó por completo San Juan, una población ubicada a 60 Km. al norte de Tumaco. El tsunami arrasó la isla barrera sobre la cual estaba asentada esta población, arrastrando todas las construcciones y dejando un saldo de por lo menos 220 personas fallecidas, en su mayoría niños, el daño por tsunami en otros lugares fue menor. En Tumaco, las olas se llevaron algunos barcos varios centenares de metros adentro de los manglares.

La línea de costa de la parte noroccidental de Tumaco se inundó localmente y la Isla barrera del Guano, ubicada al frente de las Islas de el Morro y la Viciosa, desapareció. Dado que el tsunami llegó a la costa con marea baja, los daños que éste causó no fueron mucho más desastrosos. (ver figura 6)

Figura 6. Desaparición de la isla del Guano como consecuencia del tsunami en 1979.



Por la comparación entre el nivel de mareas anterior y posterior a este fenómeno, por los relatos de los habitantes y por las señales recogidas en el campo, se comprobó la subsidencia o hundimiento a lo largo de por lo menos 200 Km. de la costa del sur del Pacífico Colombiano y norte del Ecuador. Los daños, tanto materiales como humanos, derivados como consecuencia de este terremoto a lo largo de la costa sur de Colombia - desde Tumaco (Nariño) hasta Guapi (Cauca) - fueron sumamente graves. En el departamento de Nariño, se registraron 452 muertos, 1011 heridos, 3081 viviendas destruidas y 2119 averiadas.

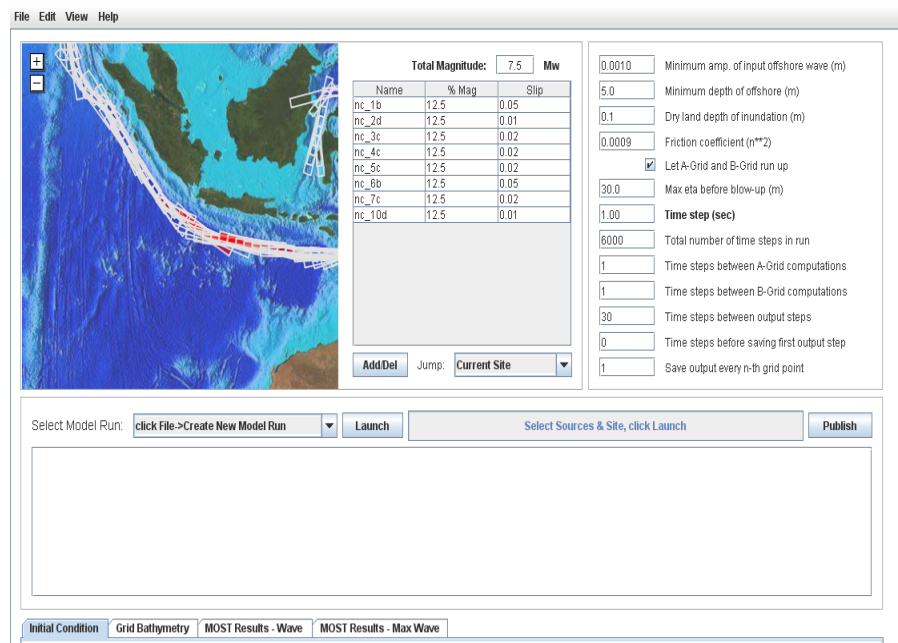
Colombia, por su ubicación geotectónica en la cuenca del Pacífico, está expuesta al impacto directo de tsunamis de fuente cercana y/o lejana, y está incluida dentro de los países que con mayor frecuencia se pueden ver afectados por estos eventos. De allí que resulta relevante la estimación de este riesgo natural, considerando el estudio del fenómeno y el análisis del comportamiento hidrodinámico de las ondas, además de la determinación de los niveles máximos

de inundación esperados para eventos extremos de campo cercano, información que es fundamental desde el punto de vista de la planificación urbana, manejo de las áreas potencialmente amenazadas y para la elaboración de los planes de emergencia en los principales centros portuarios y urbanos costeros del país.

2.1.3 Modelación numérica de tsunamis empleando el modelo MOST. El sistema de modelación numérica MOST (*Method of Splitting Tsunami*) fue desarrollado por el *Pacific Marine Environmental Laboratory* (PMEL) y la *National Oceanic and Atmospheric Administration*; MOST ha sido desarrollado como parte de la detección temprana y pronóstico ante el embate de un tsunami.

Este sistema modela las tres fases o etapas de la evolución de ondas tsunami generadas por la ocurrencia de un sismo en zona de subducción, las cuales son generación, propagación e inundación, proporcionando una completa simulación del comportamiento de un tsunami desde su origen hasta la llegada a la costa. La simulación del proceso de generación en el modelo MOST está basado en la teoría de deformación elástica y el método del computo de la inundación es derivado del modelo. Este sistema utiliza como datos de entrada la batimetría y topografía de la región a estudiar, además de la magnitud del sismo precursor y los datos o parámetros de la falla, la orientación de la falla o ángulo *strike*, el ángulo *dip*, el ángulo *rake*, el promedio de buzamiento u , y la profundidad de la fuente h , estos datos son descargados por el modelo a través de Internet. (ver figura 7)

Figura 7. Pantalla de configuración del MOST



2.1.4 Sistemas de detección de Tsunamis. El objetivo de los sistemas de alerta temprana centrados en la población es facultar a las personas y comunidades que enfrentan una amenaza a que actúen con suficiente tiempo y de modo adecuado para reducir la posibilidad de que se produzcan lesiones personales, pérdidas de vidas y daños a los bienes y al medio ambiente. Un sistema completo y eficaz de alerta temprana comprende cuatro elementos interrelacionados, que van desde el conocimiento de los riesgos y las vulnerabilidades hasta la preparación y la capacidad de respuesta.

Los sistemas de alerta temprana basados en las mejores prácticas también establecen sólidos vínculos internos y ofrecen canales eficaces de comunicación entre todos estos elementos, obedeciendo a los lineamientos de los sistemas de alerta temprana promulgados por la UNESCO.

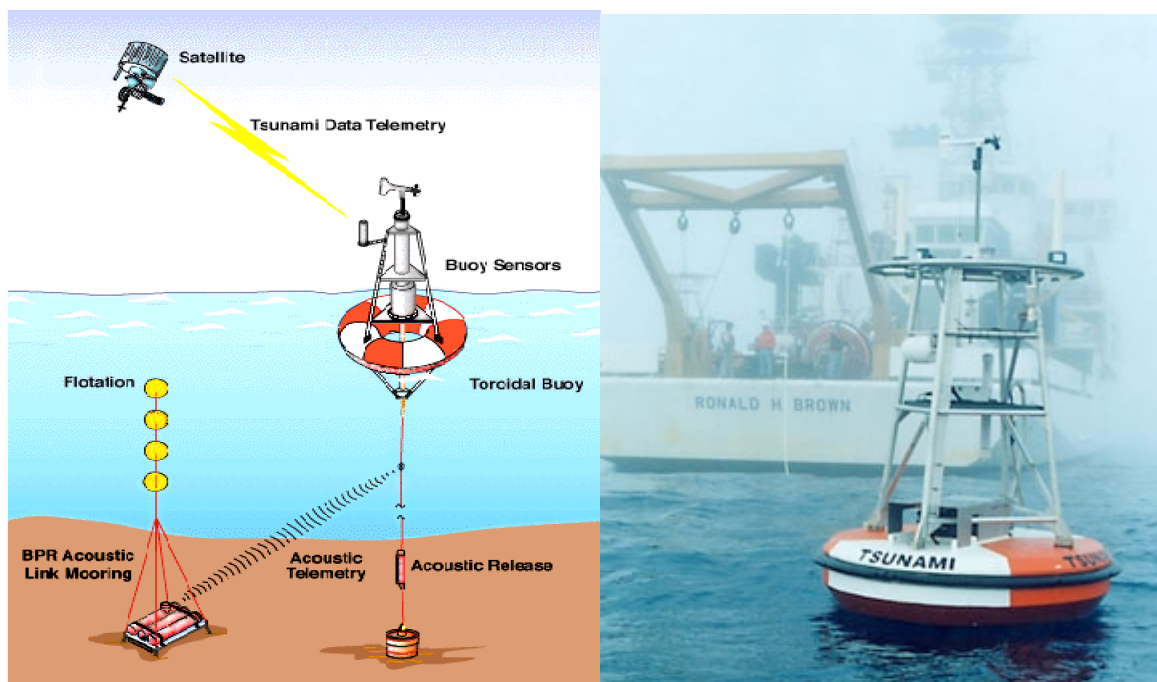
Debido a los grandes desastres que se han producido a lo largo de los años por la presencia de tsunamis, se han venido creando diferentes asociaciones a lo largo del mundo con un objetivo común, disminuir las cifras de mortalidad por causa de este fenómeno.

La primera asociación creada para esta causa es la Pacific Tsunami Warning Center (PTWC), establecida en el año de 1946 en Hawái con el fin de detectar y alertar sobre posibles tsunamis que podrían afectar las costas de Estados Unidos. Países como México, a través del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y de la Secretaría de la Armada de México en colaboración con la NOAA, instalaron a partir de 1992 tres mareógrafos con transmisión en tiempo real, y en 2004 fue puesto en operación un sensor del nivel del mar de alta frecuencia con transmisión de tiempo real vía Internet actualizado cada minuto, siendo este el prototipo base para la instalación de una red que integraría el sistema de alerta temprana de tsunamis en México.

Uno de los proyectos visionarios de mayor desarrollo en sistemas de detección temprana de tsunami son las estaciones de mar abierto para la evaluación y reporte de tsunami (DART por sus siglas en inglés), desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), como parte del programa de la disminución de riesgos por tsunami en los Estados Unidos.

Consiste en un sistema que utiliza un registro de presión del fondo, recolectando datos cada 15 segundos y con capacidad de detectar y medir ondas tsunamis de 1 cm. de amplitud a 600m de profundidad, la transmisión de los datos se hace por medio de módems acústicos a una boya en la superficie que a su vez transmite a una estación vía satélite. (ver figura 8)

Figura 8. Esquema general del sistema DART



Sistemas de detección de tsunamis a nivel nacional. En Colombia, en caso de un posible evento de tsunami la Corporación OSSO recibe soporte técnico del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) quienes informan detalles del sismo como magnitud, duración y ubicación; del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) con información sobre el nivel del mar; y de la Dirección General Marítima - Centro Control Contaminación del Pacífico (DIMAR-CCCP) sobre modelaciones matemáticas, el tiempo calculado de llegada de la ola y de su altitud. A continuación, la Corporación OSSO hace las consultas pertinentes con la CCO y posteriormente informa a la Dirección de Gestión del Riesgo (anteriormente conocida con la sigla DPAD) para que sea esta última quien, según las características del evento, emita la Alerta o Alarma a los Comités Regionales de Prevención y Atención de Desastres (CREPAD) y los Comités Locales para la Prevención y Atención de Desastres (CLOPAD) respectivos para preparar la población para la evacuación.

Si la Dirección de Gestión del Riesgo emite alerta, la Corporación OSSO procederá a verificar con los Centros de Alerta por tsunami regionales y mundiales, y entidades nacionales de competencia, para establecer si es necesario continuar con la evacuación o cancelar la alerta. Actualmente la DIMAR-CCCP ha creado el Centro de Alerta por Tsunami - CAT con el que apoya técnicamente a la Corporación OSSO en la toma de decisiones dentro del Sistema

Nacional de Alerta de Tsunami y se prepara para poder tomar mayores responsabilidades en el eventual momento en que pudiera cambiar el decreto que regula este sistema de alerta.

El Centro de Investigaciones Oceanográficas e hidrográficas del Pacífico (DIMAR-CCCP), ha trabajado de manera conjunta con la comisión colombiana de océano y el Observatorio Sísmico del Sur Occidente (OSSO) para crear estrategias que permitan generar alarmas oportunas ante la presencia del fenómeno tsunami, buscando mecanismos para proveer información oportuna y de calidad para la generación de reportes que permitan dar aviso acerca de algún suceso que puedan desencadenar evento sismo- tsunami, dando origen al Centro de Alerta Temprana (CAT). (ver figura 9)

Figura 9. Centro de Alerta Temprana por tsunami y estación mareográfica ubicados en la base naval de Tumaco



2.1.5 Sismos, placas y fallas tectónicas:

2.1.5.1 Sismos. Los sismos son movimientos convulsivos de la corteza terrestre resultan de un rápido deslizamiento de la falla debido al movimiento de placas, se clasifican en microsismos, cuando son imperceptibles; macrosismos cuando son notados por el hombre y causan daños en enseres y casas, y megasismos, cuando son tan violentos que pueden producir la destrucción de edificios, ruina de ciudades y gran número de víctimas.

Los sismos pueden ser de origen tectónico, volcánico o local; los sismos tectónicos producen el 90% de los terremotos y dejan sentir sus efectos en zonas

extensas, estos pueden ser interplaca (zona de contacto entre placas) o sismos intraplaca (zonas internas de estas). Los sismos interplaca son el 5% del total de los sismos ocurridos en el mundo, aparecen a una profundidad entre los 70 y 300 km.

Estos son típicos de zonas de subducción, son los segundos en energía, ya que a esta profundidad la tierra no almacena tanta como en el caso de los sismos plutónicos, pero dado su carácter somero son destructivos, esta clase de sismos son los causantes de la generación de tsunamis. (ver figura 10)

Figura 10. Zona de subducción.



2.1.5.2 Placa tectónica. El término placa tectónica hace referencia a las estructuras por la cual está conformado nuestro planeta, en términos geológicos, una placa es una plancha rígida de roca sólida que forma la superficie de la tierra (litósfera), flotando sobre roca ígnea y fundida que conforma el centro del planeta (astenósfera).

El territorio colombiano comprende un dominio continental deformado situado en el límite de tres placas tectónicas mayores; la placa Suramericana, la placa Nazca y la placa Caribe, en la actualidad estas tres placas se están acercando entre sí, dando origen a deformaciones en la corteza continental, actividad volcánica, y a una intensa actividad sísmica en el territorio colombiano, en este caso la placa Nazca converge hacia el este con respecto a la placa Suramericana.

A una velocidad de aproximadamente 7cm/año, la convergencia relativa estas dos placas se absorbe entre la zona de subducción del pacífico y a lo largo de los sistemas de fallas. Esta fuente sísmica generó los dos terremotos más grandes

que afectaron al país durante el siglo XX (1906 y 1979), con magnitudes de $M_w = 8.6$ y 8.1 respectivamente [32].

2.1.5.3 Fallas tectónicas. Una falla tectónica es el área donde confluyen dos ó más placas tectónicas que interactúan mutuamente o zonas de quiebres en la corteza terrestre. Las placas tectónicas al encontrarse en un continuo contacto, generan esfuerzos de compresión que acumulan energía de forma elásticas. (ver figura 11)

Figura 11. Placas Nazca, Suramericana y Caribe.



Al generarse una ruptura en las fallas, éstas liberan de forma repentina dicha energía acumulada. Si la ruptura o foco se presenta a poca profundidad de la corteza terrestre bajo el mar, ésta es capaz de generar desplazamientos importantes en dicho fondo marino, cuya área se encuentra relacionada con la energía liberada por el sismo. Dependiendo de las características geológicas y mecánicas de las fallas tectónicas, éstas pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de desplazamiento, de la siguiente forma:

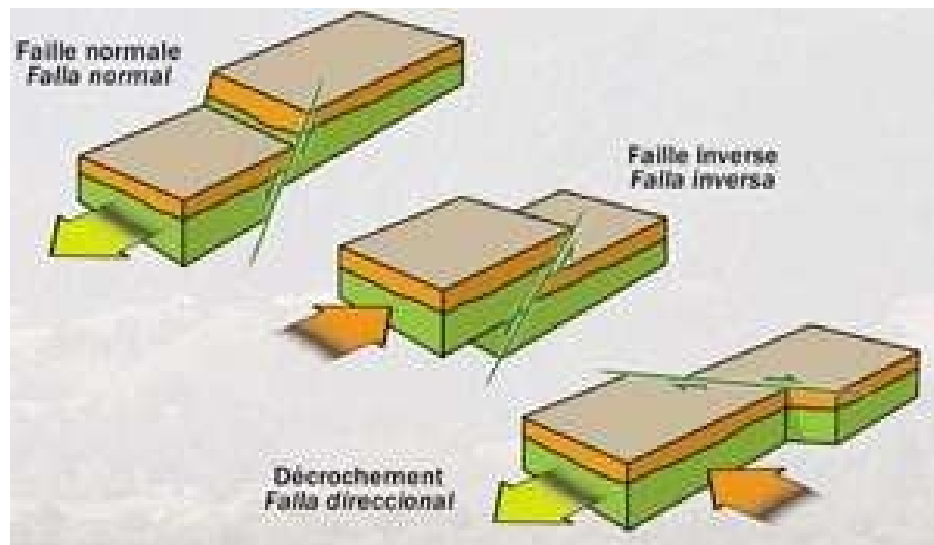
Falla normal: Fractura geológica en la cual uno de los bloques se ha movido hacia abajo con respecto al otro bloque. Este tipo de falla debe su origen a la presencia

de fuerzas extensivas que actúan perpendicular a la traza de la falla. $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $\theta = -90^\circ$.

Falla dextral o sinistral : Define al tipo de falla de movimiento paralelo al rumbo, si el desgarre lo hace el bloque ubicado a la derecha para un observador lejano es dextral $\theta = 90^\circ$ y $\theta = 180^\circ$ y si es el bloque izquierdo es sinistral. $\theta = 90^\circ$ y $\theta = 0^\circ$.

Falla inversa: Fractura geológica en la cual uno de los bloques se ha movido hacia arriba con respecto al otro bloque. Este tipo de falla debe su origen a la presencia de fuerzas compresivas que actúan perpendiculares a la traza de falla. $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $\theta = 90^\circ$. (ver figura 12)

Figura 12. Tipos de desplazamientos de la falla.



Los grandes tsunamis son generados por terremotos con epicentros poco profundos y con un movimiento del fondo vertical “tipo pistón”; provocados por el desplazamiento de fallas normales e inversas. Los tsunami que viajan grandes distancias a través del océano son causados por desplazamientos unipolares, esto es, cuando una de las placas se mantiene fija y la otra se desplaza verticalmente en el fondo marino, generándose un cambio neto de volumen.

2.1.6 Costa pacífica colombiana. Situado en el extremo occidental del país, el litoral Pacífico Colombiano está ubicado geográficamente entre los paralelos $1^\circ 30'$ hasta los $7^\circ 10'$ de latitud norte y entre los $77^\circ 40'$ y $82^\circ 00'$ de longitud oeste. La región costera tiene aproximadamente 80000 km cuadrados de superficie, siendo sus límites geográficos: la hoya del río Juradó, al norte ($7^\circ 28' N$); el río Guaitará,

al sur ($0^{\circ}14'$ N); el nacimiento del río San Juan, al este ($75^{\circ} 51'$ W), y la desembocadura del río Mira en Cabo Manglares, al oeste ($79^{\circ} 02'$ W).

Esta delimitación de la zona costera se encuentra incluida dentro de la franja conocida como la ensenada de Panamá, la cual se extiende por las costas de Panamá, Colombia y Ecuador hasta la longitud $81^{\circ}W$. En esta región se encuentran dos de los principales puertos del país, Tumaco y Buenaventura además se localiza Málaga lugar donde se ubican varias poblaciones y la base militar de Málaga. El municipio de San Andrés de Tumaco está ubicado en el sur occidente, en el departamento de Nariño, la ciudad de Buenaventura está ubicada al occidente, en el departamento del Valle del Cauca y Málaga está ubicada en el departamento del Valle del Cauca en límites con el Chocó.

Una de las grandes preocupaciones frente a la amenaza de tsunami presentada en esta región del país debido a la alta probabilidad de eventos sísmicos precursores, es la gran densidad poblacional existente en la zona del litoral pacífico colombiano. Es por esta razón que en la actualidad existen diferentes entidades a nivel nacional e internacional realizando acciones que permitan solventar el riesgo existente frente a eventos sísmicos precursores de tsunami. (ver figura 13)

Figura 13. Principales poblaciones costeras en la Costa Pacífica Colombiana.



Esta zona del país es de las más propensas a que ocurran eventos ligados a sismos en la corteza oceánica subducida, debido a que esta actividad sismotectónica es superficial y teniendo en cuenta que en la zona Pacífica han ocurrido grandes sismos de subducción durante el siglo XX.) Un sismo cuyo epicentro se ubique en el lecho marino y que presente una magnitud mayor a Mw 6.5 podría desencadenar la generación de un tsunami, lo que se traduce en una

grave amenaza para esta zona cercana a la costa a lo largo de este litoral, puesto que la mayoría de poblaciones ubicadas cerca a la costa se levantan sobre palafitos o en lugares amenazados por inundaciones.

2.1.7 Características físicas de una onda de tsunami en la costa pacífica colombiana. La costa pacífica colombiana presenta generalmente una topografía de pendientes suaves en forma de rampas en la que la plataforma continental penetra suavemente en el mar, esto permite que la energía del tsunami sea transmitida en su totalidad, y por lo tanto, se incrementa el poder destructivo del mismo. Estas costas son de alto riesgo debido a las olas de gran altura que se producirían si presentara un evento de tipo tsunamigénico. En este caso la pérdida de energía es sólo por roce.

En las bahías puede haber reflexión en los bordes de las costas; en este caso si el período es igual al tiempo que demora en recorrer la bahía, al llegar la segunda ola puede verse reforzada con un remanente de la primera y aumentar la energía al interior de la bahía, este es el fenómeno de resonancia. Esta condición puede producir la amplificación de las alturas del tsunami al interior de una bahía como el caso de la bahía de Tumaco.

Buenaventura por ser una bahía compuesta por diversos esteros, presente una leve disminución en los efectos directos del impacto de una posible ola de tipo tsunami, esto se debe a que los esteros proporcionan cambios de pendiente, que hará que la onda de tsunami pierda gradualmente su energía cinética y por tanto potencial, lo anterior debido a los choques sucesivos de la masa de agua con el fondo marino. Las olas van disipando su energía en las paredes con los cambios bruscos de profundidad.

La topografía de las tierras emergidas influye directamente en la penetración del tsunami en superficie. Cuando la pendiente es relativamente fuerte la extensión de la zona inundada no es significativa, en cambio, cuando el terreno es plano o con escasa pendiente, la penetración puede abarcar kilómetros tierras adentro.

La costa pacífica colombiana presenta una morfología submarina bastante variada de acuerdo a cada una de las poblaciones que hacen parte de ellas, provocando diversas características de propagación de posibles olas tsunamis.

La costa pacífica colombiana presenta una profundidad promedio de 4000 metros en mar abierto, consiguiendo con ello una velocidad de propagación de una onda tsunami de 7000 kilómetros por hora obtenida a partir de la fórmula mostrada en la tabla 2, donde h es la altura de 4000 metros y $g=9.8$ metros por segundo $(9,8 \times 4000)^{1/2} = 200 \text{ ms}^{-1} = 700 \text{ km/h}$. (ver tabla 3)

Tabla 3. Características físicas de un tsunami originadas por sismos precursoros en la costa pacífica. Fuente: Autor

Características	Tsunami	Ola común
Periodo T	300 a 3600 segundos (5 a 60 minutos)	1 a 25 segundos
Frecuencia $F=1/T$	0.0033 a 0.00027 Hz	0,06667 Hz
Longitud de onda $L=V*T$	500 a 650 km	90 a 300 metros en el pacifico
Velocidad $V= (g*h)$	500 a 1000 km/hs 300 a 600 millas/hs	Menor a 100 km/hora
Amplitud de la ola	Mar profundo: menor a 1 m Aguas someras: 30 metros	Mar profundo: menor a 13 metros Aguas someras: 6 metros
Perturbación en el fondo	Perturbación total de la columna de agua.	No existe una perturbación, solo en la superficie del agua

Para lograr identificar una ola de tipo tsunami evitando generar falsas alarmas en la población se debe realizar un sensado de los cambios de presión en una escala milimétrica presentados en la columna de agua. El intervalo de muestreo de los datos debe ser lo suficientemente rápido para permitir caracterizar la forma de la onda tsunami en tiempo real.

2.1.8 Equipo de comunicación UHF. Radio módem MHX 910 A. El radio módem MHX 910 A funciona en la banda de frecuencia UHF, cuenta con una técnica de modulación de espectro ensanchado con un sistema de salto de frecuencia, en el cual la frecuencia de la portadora del transmisor cambia abruptamente de acuerdo a una secuencia pseudoaleatoria que consiste en un grupo de secuencias binarias que presentan propiedades aleatorias como las señal de ruido, pero que muestran una periodicidad. Este método de ensanchamiento optimiza el rendimiento del sistema en cuanto a posibles pérdidas de datos e interferencias, esto debido a que la señal ensanchada puede convivir con otras señales de banda estrecha, existe un aumento considerable de la relación señal a ruido, y es posible maximizar el uso del canal, esto hace que al momento de la transmisión el ancho de banda no sea una limitante. El orden de las secuencias seleccionadas por el transmisor viene dictado por la secuencia del código. El receptor por su parte rastrea estos cambios y de esta forma es posible la comunicación entre estos.

Los sistemas que utilizan la tecnología de espectro ensanchado (SPREAD SPECTRUM), son sistemas de banda ancha, caracterizándose por transmisiones de baja densidad de potencia, que minimizan la posibilidad de interferencia, mejoran la utilización del espectro radioeléctrico, además, poseen una notable inmunidad a las Interferencias. Todas estas ventajas hicieron que sea necesaria la regulación de estos sistemas. (ver figura 14) y (ver tabla 4)

Figura 14. Radio módems UHF MHX 910 A y su Diagrama físico

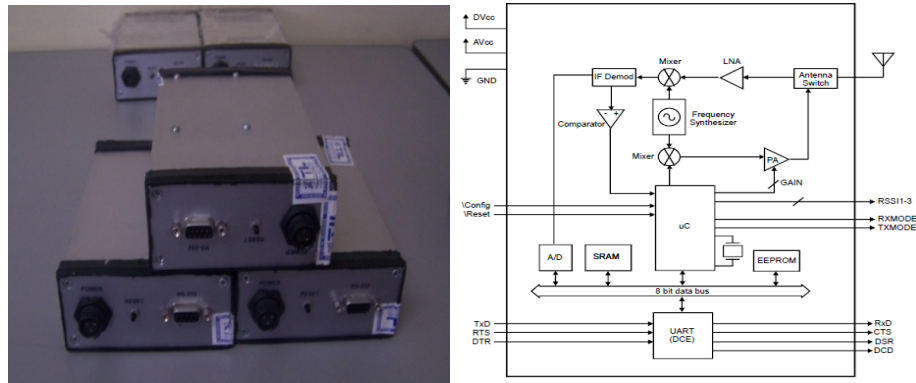


Tabla 4. Especificaciones técnicas del radio- modem MHX-910 A

Especificaciones	MHX 910A Radio Modém
Frecuencia de operación	902-928 MHz
Tipo de modulación	Frequency Hopping Spread Spetrum
Rango de comunicación	60 millas con claridad en línea de vista
Potencia de Salida	10mW a 1W
Alimentación	9 a 30 VDC 4.2 W
Consumo	350 mA a 12 V
Interface Serial	RS-232/RS485/RS422
Velocidad de transmisión	1.200-115.200 bps
Modos de Operación	Punto a punto, punto a multipunto, peer to peer, TDMA
Interfaz de datos	RS232 Asíncrono, 0-5 VDC CMOS nivel lógico
Requerimientos de potencia	5 VDC, 1.5 Amperios
Ganancia del sistema	135 dB
Sensibilidad	-105 dBm
Interfaz de usuario	Comandos AT
Detección de error	32 bits de CRC con auto retransmisión
Corrección de error	Forward Error Corrección

3. PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN

Para el diseño del sistema de detección de alerta temprana por variaciones extremas en el nivel del mar en la costa pacífica colombiana, se ha seleccionado a San Andrés de Tumaco como modelo de aplicación para el desarrollo de la metodología debido a la disponibilidad de herramientas y fuentes de información que proporcionan condiciones favorables para la presente investigación.

El proyecto se encuentra comprendido por diferentes elementos y subsistemas que hacen posible su completo funcionamiento. Dentro de estos sistemas se encuentra el sistema de comunicación, el sistema de sensado y el sistema de alimentación fotovoltaico.

Para la identificación de los sitios de instalación de los equipos fue necesaria la realización independiente de diferentes estudios empleando herramientas de modelación numérica de tsunamis (MOST y TIME) y simulación de enlaces de comunicación con ayuda del software Radio Mobile los cuales se encuentran descritos en este capítulo.

Dentro del diseño de un sistema de detección de variaciones extremas en el nivel del mar tal como es el objetivo de la presente investigación, es indispensable la apropiación de herramientas de análisis de series temporales que permitan determinar con un alto grado de aproximación, la identificación de patrones y tendencias presentes en la señal, como por ejemplo periodos dominantes en la señal.

Las series temporales empleadas como parte fundamental en el desarrollo de esta investigación, están representados por registros mareales obtenidos por medio de sensores de presión y serán estudiados por medio del análisis en frecuencia, análisis armónico y análisis estadístico.

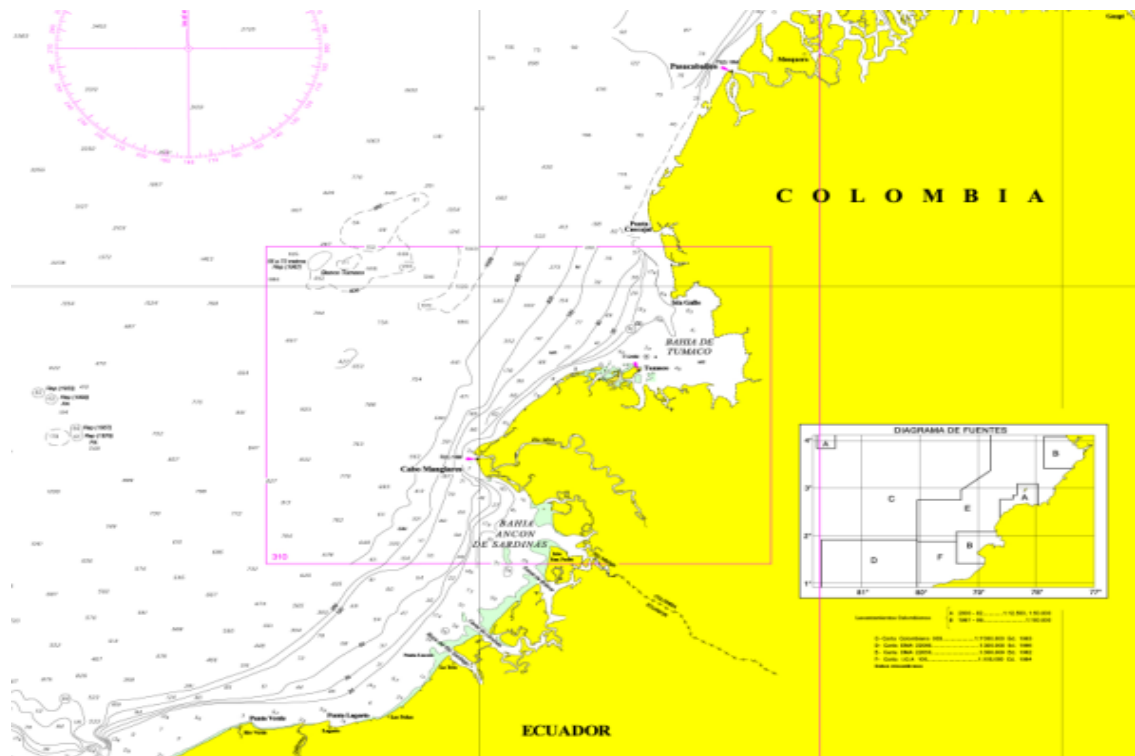
3.1. ESTUDIO Y DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE SENSADO

Como punto de partida en la determinación del sitio de instalación del sistema de sensado que será instalado en las boyas diseñadas como parte del desarrollo de este proyecto, se debe tener en cuenta que el tipo de tsunami que el sistema busca detectar son los tsunamis de origen cercano y por tanto los sismos precursores que generan este fenómeno se presentarán a distancias inferiores a los 200 kilómetros medidos a partir de la línea de costa.

Conociendo el mecanismo de propagación de una ola de tipo tsunami se busca que el sitio de instalación del sistema presente una profundidad que garantice que la variación extrema producida por la propagación de dicha onda pueda ser identificada con mayor exactitud por sensores de presión que se emplearán como instrumento de medida del nivel del mar.

A través de la carta náutica COL 032 desarrollada por el CIOH (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas) que representa la parte sur de la costa Pacífica Colombiana, el programa Google Earth y el mapa realizado por el Instituto oceanográfico de la armada del Ecuador (INOCAR) para el estudio de la batimetría y relieve continental, fue posible analizar las características físicas más relevantes presentes en el área de estudio, como son la batimetría de la zona, la posición geográfica (longitud, latitud, distancia) y la morfología continental. (ver figura 15)

Figura 15. Carta náutica COL 032 que representa la bahía de Buenaventura y Tumaco, en la cual se observa la batimetría de la zona de estudio.



Por medio de la inspección visual de los mapas y de la herramienta Google Earth se seleccionaron tres posibles puntos de instalación los cuales están ubicados a diferentes distancias medidas a partir de la línea de costa de la bahía de Tumaco. Estos puntos fueron seleccionados teniendo en cuenta las características propias

de propagación de las ondas de tipo tsunamigénicas con relación al nivel medio del mar y las especificaciones técnicas de instalación de los equipos que hacen parte del sistema de sensado remoto. (ver tabla 5)

Tabla 5. Puntos seleccionados por inspección visual para la instalación del sistema de sensado de alerta temprana.

Boya	Posición	Batimetría (metros)	Distancia (kilómetros)
A	1.7675 N 80.019 W	3050	185
B	1.8790 N 79.1919W	810	50
C	1.8390 N 78.9202W	100	25

Otro aspecto sumamente relevante en el diseño del sistema de alerta temprana es el tiempo de arribo de la primera ola de acuerdo a los diferentes sismos precursores generadores de tsunami, esto nos permite conocer el periodo de tiempo con el que se dispone para desarrollar el diseño de la etapa de adquisición y transmisión de los datos, y por consiguiente la determinación del tiempo de respuesta con el que cuenta la población posiblemente amenazada para desarrollar los mecanismos de prevención de riesgos por la presencia de este tipo de fenómenos naturales.

En búsqueda del discernimiento del tiempo de arribo de la primera ola de tipo tsunami se emplearon modelaciones numéricas realizadas con el modelo numéricos TIME como parte de estudios desarrollados en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico denominado "Modelación de Tsunamis en la Costa Pacífica Colombiana" publicado en el año 2005 [6]. Además se empleó el modelo numérico MOST, utilizando para las simulaciones numéricas, fuentes de información geográfica (batimétrica y topográfica) y mallas de cálculo, suministrados en el estudio denominado "Identificación de escenarios de riesgos por tsunami para el litoral pacífico colombiano a partir de la simulación de eventos tsunamigénicos, implementando el sistema de modelación numérica MOST" desarrollado en el 2009.

Los parámetros sísmicos y la selección de los rectángulos de deformación se seleccionarán basados en eventos sísmicos precursores de tsunamis ocurridos en el presente siglo en la región. Las características de los parámetros utilizados en dichas modelaciones se presentan a continuación.

3.1.1 Fuentes de información batimétrica y topográfica. Para la implementación del modelo TIME y el modelo MOST se requiere de información batimétrica y topográfica de las zonas que serán objetivo de nuestro estudio.

La información batimétrica se obtuvo del proyecto ETOPO2 (Smith & Sandwell, 1997), con una resolución de 2' arco; de cartas náuticas levantadas por el centro de investigaciones hidrográficas y oceanográficas CIOH, y de información batimétrica de detalle obtenida por el CCCP durante el año 2004, la información topográfica del instituto Geográfico Agustín Codazzi y CCCP 2000.

3.1.2 Selección de las mallas de cálculo para el modelo TIME. Para la selección del tamaño de las mallas de cálculo se emplearon dos criterios, la resolución necesaria en los campos de inundación y la estabilidad numérica del modelo.

Con base en la alta densidad de información batimétrica y topográfica en la bahía de Tumaco, y sobre la que se desea calcular la propagación, se seleccionó un ancho de celda igual a 30 metros siendo esta la más fina.

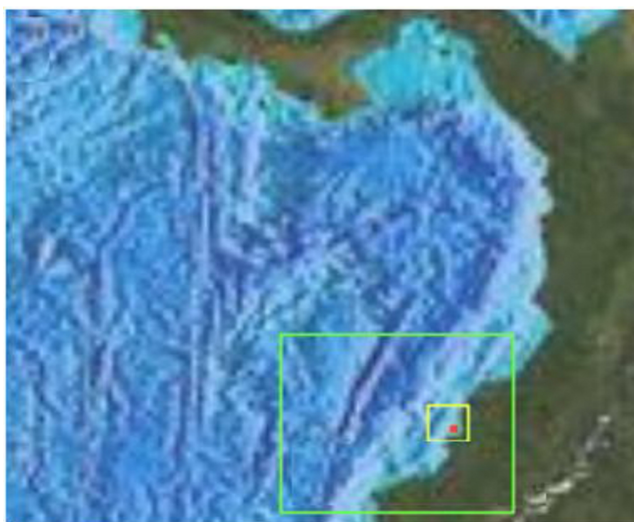
Para la modelación numérica realizada con el TIME se seleccionaron cuatro mallas de cálculo anidadas con un paso diferencial a razón de tres, la malla exterior (Malla A), el cual incluye los puntos de generación de los sismos precursores y la más interior (Malla D) el casco urbano de Tumaco, la Malla C contiene la Bahía de Tumaco y la malla B es el tránsito numérico.

Por otro lado en el modelo MOST se empleó tres mallas de cálculo A, B y C, siendo la malla A la más externa, donde la malla A cubre la mayor superficie utilizada en el cálculo de la fase de inundación y define el límite de la fase de propagación, la malla B es una región de transición para mejorar la exactitud de los cálculos del modelo de inundación y la malla C que es la malla de mayor resolución, tiene un área de cobertura inferior pero es la que determina el nivel de inundación en la población que es objeto de estudio. (ver tabla 6) y (ver figura 16)

Tabla 6. Características de las mallas empleadas en las modelaciones realizadas con el MOST y el TIME

Modelo numérico	Malla	Extremo inferior izquierdo	Extremo superior derecho	AX-AY [s]
TIME	A	(-83.001111W, 0.10388889N)	(-76.9936111W, 5.99888889N)	27
	B	(-79.998611W, 1.50138889N)	(-76.9986111W, 5.00388889N)	9
	C	(-79.000278W, 1.59972222N)	(-78.500277W, 2.19972222N)	3
	D	(-78.820000W, 1.7700000N)	(-78.7200000W, 1.8400000N)	1
MOST	A	(-81.391945°W, 0.408055°N)	(-78.7100004°W, 1.840000°N)	36
	B	(-79.150278°W, 1.609772°N)	(-78.5102778°W, 2.189722°N)	6
	C	(-78.82000°W, 3.8400000°N)	(-77.000000°W, 3.9400000°N)	1

Figura 16. Mallas anidadas empleadas en el cálculo numérico con el modelo MOST.



3.1.3 Selección de los puntos de extracción de señales sintéticas de tsunamis. Los puntos seleccionados para la extracción de señales sintéticas en el modelo TIME fueron determinados teniendo en cuenta la distribución de estas a lo largo de la costa pacífica colombiana que es el área de objetivo de esta investigación y además se tuvo en cuenta las zonas que presentan un alto potencial sísmico. Por otro lado el cálculo de la inundación se realizó en el casco urbano de Tumaco a partir de la teoría no lineal de las ondas largas. (ver figura 7)

Tabla 7. Posición de los puntos de detección analizados con el modelo TIME

Boya	Longitud (grados)	Latitud (grados)
B.1	-79.8	4.8
B.2	-79.0	3.5
B.3	-79.5	2.5
B.4	-81.0	2.0

3.1.4 Estado de la marea (TIME). El nivel de marea durante un evento de tsunami en el pacífico colombiano es una variable determinante para la evaluación de la magnitud de inundación provocada por dichas ondas. Para definir los niveles máximos y medios a ser utilizados en las simulaciones se consideró la serie de marea registrada en el periodo [1951-2000]. Se considera para las modelaciones de tsunami durante marea media un valor de 2.2 metros y una marea alta de 3.6 metros. (ver tablas 8 y 9)

3.1.5 Sismos precursores seleccionados. Teniendo en cuenta el alto potencial sísmico presente en la Costa Pacífica Colombiana debido a la zona de subducción ubicada paralela a la costa y la falla de Panamá, se hizo la división de las zonas con un alto potencial de ocurrencia de posibles eventos sísmicos desencadenadores de tsunami empleando registros históricos con base a información suministrada por INGEOMINAS. (ver figuras 17 y 18)

Figura 17. Localización de epicentros sísmicos de origen cercano empleados en el TIME.

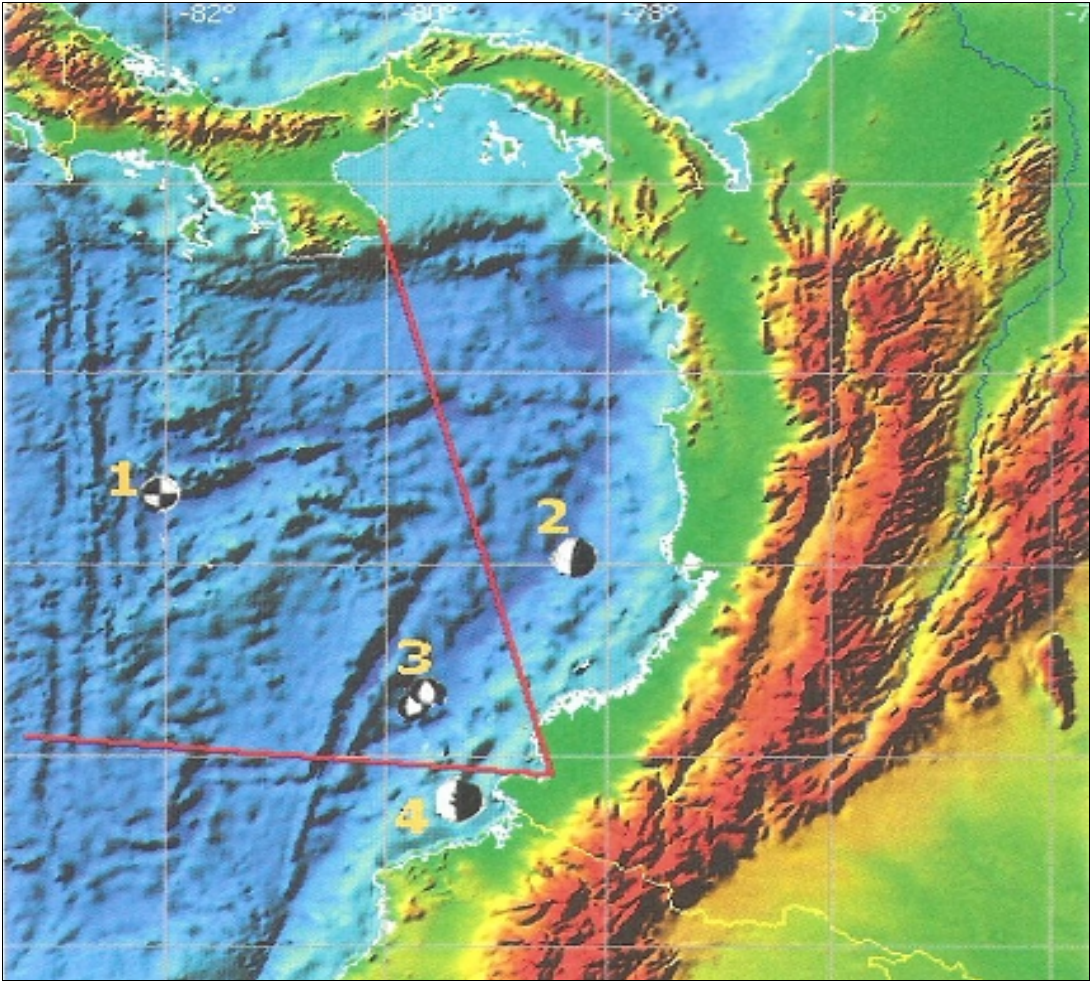


Tabla 8. Localización de epicentros sísmicos empleados en la modelación numérica realizada con el TIME

Modelo Numérico	Numero de epicentro	Localización del epicentro
TIME	1	5.18 N, -82.50 W
	2	4.50 N, -78.0 W
	3	2.77 N, -79.76 W
	4	1.57 N, -79.36 W

Figura 18. Localización de epicentros sísmicos de origen cercano empleados en el MOST.

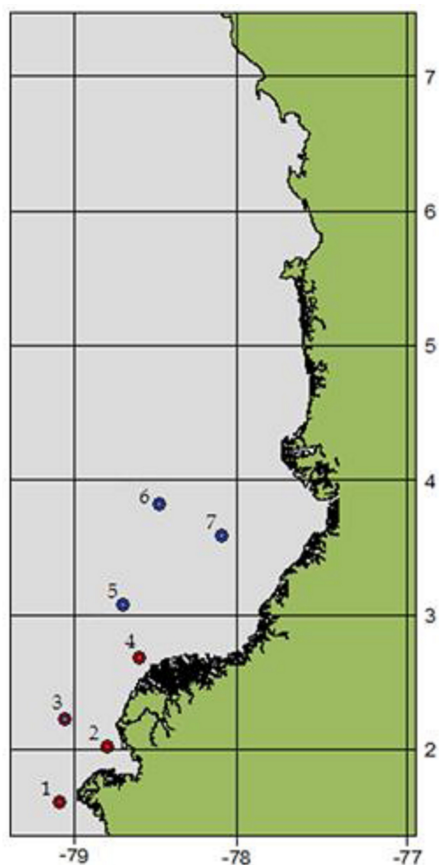


Tabla 9. Localización de epicentros sísmicos empleados en la modelación numérica realizada con el MOST

Modelo Numérico	Numero de epicentro	Localización del epicentro
MOST	1	1.159 N, -79.273 W
	2	1.944 N, -78.734 W
	3	2.167 N, -79.140 W
	4	2.661N,-78.3110 W
	5	2.9030 N, -78.66 W
	6	3.634 N, -78.153 W
	7	3.3386N, -77.80 W

Como resultado de las simulaciones desarrolladas con el TIME se encontraron los tiempos de arribo y altura de la primera ola en las poblaciones que hacen parte de la bahía de Tumaco, los cuales pueden ser observados en la tabla 11, donde Tllegada representa el tiempo de arribo de la primera ola y h representa la altura de la misma. (ver tabla 10)

Tabla 10. Resultados de las simulaciones realizadas con el modelo TIME.

Población	Sismo 2 8 Mw		Sismo 3 8 Mw		Sismo 4 7.9 Mw	
	Tllegada (minutos)	h (metros)	Tllegada (minutos)	h (metros)	Tllegada (minutos)	h (metros)
Vaquería	36	0.38	32	0.80	22	2.62
Punta Cascajal	40	0.32	34	0.76	26	2.33
Tumaco	45	0.45	40	1.05	31	2.74
Llanaje	56	0.31	52	0.54	42	1.54
Soledad	67	0.3	62	0.97	58	2.31
Trujillo	71	0.37	65	1.24	62	2.49
Colorado	73	0.22	78	0.79	64	1.73
Caleta	75	0.27	72	0.64	65	1.61

Como puede observarse en la tabla 10, el tiempo de llegada más crítico de la primera ola de tsunami en la Bahía de Tumaco se presenta en un periodo de 22 minutos en la población de Vaquería con el sismo cuatro con 7.9 Mw de magnitud. Este resultado tiene mucha coherencia ya que el sismo que produce este tiempo de arribo se encuentra en la posición 1.57 N, -79.36 W el cual es el epicentro más cercano a la línea de costa de la población y corresponde al epicentro número cuatro. (ver figura 19)

Por otro lado, en las modelaciones numéricas realizadas con el MOST, se emplearon magnitudes de sismos de origen cercano entre 6.3 Mw y 8 Mw, un nivel de marea alto de 3.6 metros y medio de 2.2 metros los cuales son valores idénticos a los empleados en las modelaciones numéricas desarrolladas con el TIME, lo que permite realizar una comparación mas eficiente de los resultados.

Figura 19. Población de Vaquería.



Como producto de estas simulaciones se identificó el escenario de mayor riesgo para la población de Tumaco, con la simulación del sismo precursor localizado en las coordenadas 1.159 N, -79.273 W, correspondiente al sismo uno de la figura 17, en la cual se asumió un tipo de marea alta y una magnitud de sismo de 8 Mw, obteniendo un tiempo de llegada de la primera ola a la costa de 14 minutos y altura de la ola de 3.909 metros.

Teniendo claridad de que el sistema de alerta temprana debe ser capaz de proporcionar información oportuna a la población en las condiciones más críticas de generación y propagación de la ola de tsunami, se empleó en el diseño el peor de los casos posibles y es esta la razón por la cual se considera el tiempo de arribo de la primera ola de 14 minutos encontrado como resultado de las modelaciones numéricas realizadas en el MOST, en comparación con el tiempo de arribo de 22 minutos encontrado como resultado de las simulaciones implementadas con el modelo numérico TIME.

Retomando las posiciones parciales para la ubicación de las boyas del sistema de alerta temprana obtenidas anteriormente por inspección visual de mapas y de la herramienta Google Earth, y considerando además las especificaciones técnicas de instalación de los equipos de sensado y las características de propagación de una onda de tipo tsunami con relación a la profundidad y su longitud de onda, el siguiente paso es constatar el potencial de detección de estos puntos predeterminados.

Para ello se realizó la simulación de tsunamis de magnitud 8.2 Mw y 8.8 Mw en la escala de Richter empleando fallas localizadas cerca de la zona de subducción del Pacífico entre Colombia y Ecuador, relacionándolas de esta forma con parámetros sísmicos reales tales como los eventos tsunamigénicos ocurridos en el año de 1979 en esta región. (ver figura 20) y (ver tabla 11)

Figura 20. Puntos de instalación parciales del sistema de alerta temprana para la Bahía de Tumaco.

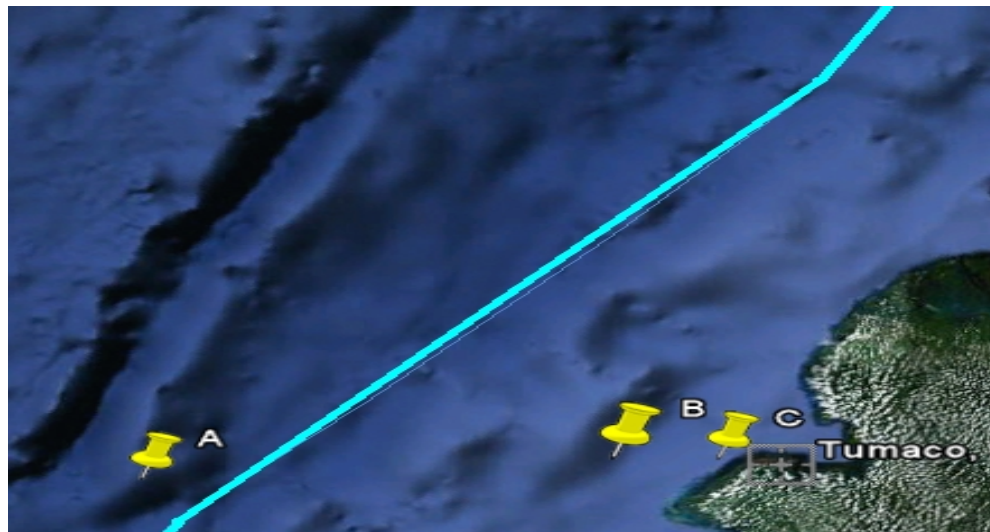


Tabla 11. Características de los puntos parcialmente determinados por inspección visual de los mapas. Fuente: Autor

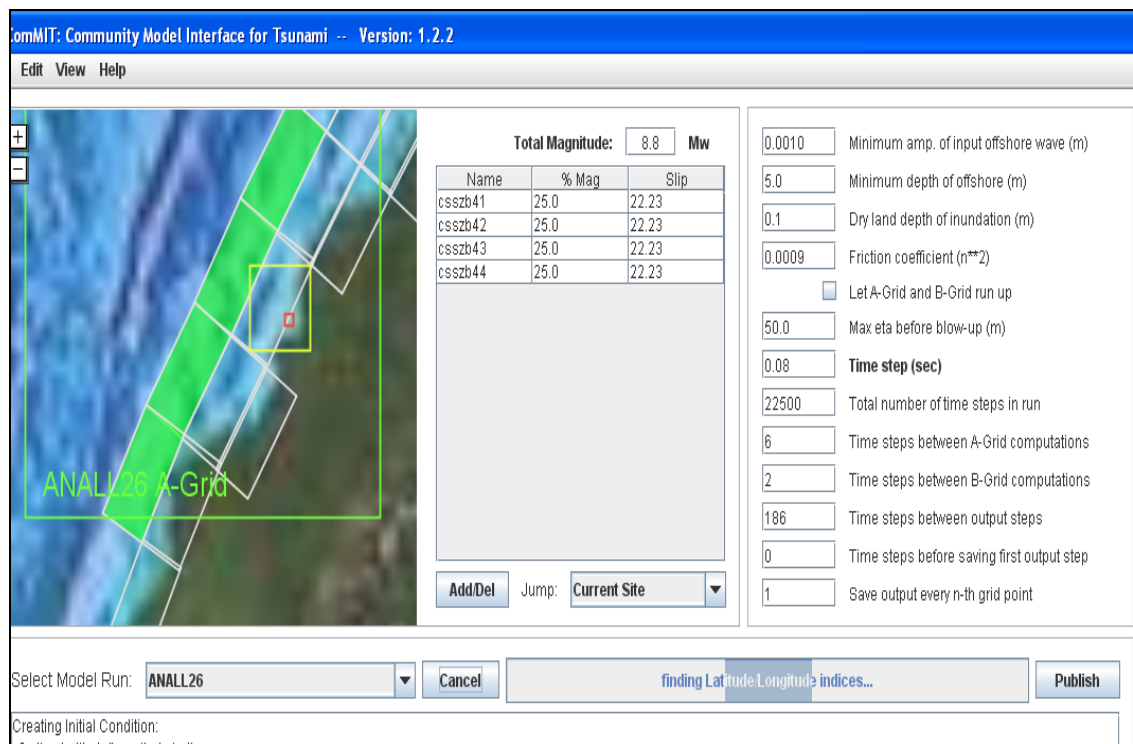
Boya	Posición	Batimetría (metros)	Distancia (kilómetros)
A	1.7675 N 80.019 W	3050	185
B	1.8790 N 79.1919W	810	50
C	1.8390 N 78.9202W	100	25

Se puede observar además el límite de las placas de Nazca y Suramérica (línea azul celeste) gracias al ejecutable de la USGS el cual provee los límites de las

placas tectónicas. La boya A se encuentra ubicada después de la zona de subducción y las boyas B y C se encuentran instaladas en puntos más cercanos a la línea de costa de la Bahía de Tumaco.

Con el desarrollo de estas simulaciones se busca conocer el potencial de detección de estos tres puntos observando la amplitud y el tiempo de arribo de las olas tsunami generadas al producirse un evento sísmico a una distancia menor a los 200 kilómetros de la línea de costa. (ver figura 21)

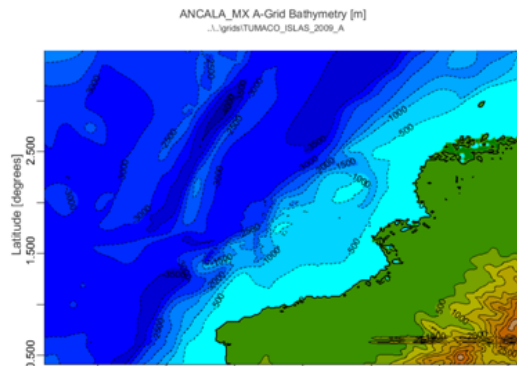
Figura 21. Pantalla de configuración del MOST de las simulaciones realizadas.



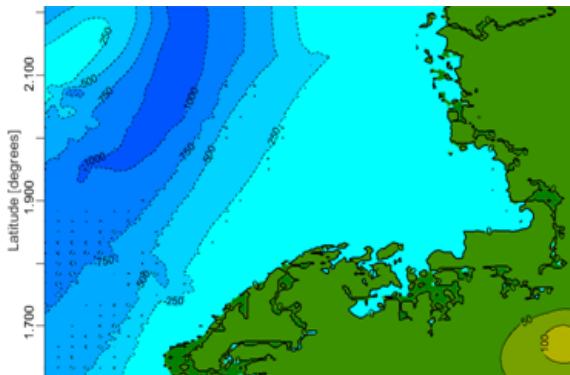
En la figura 22, 23 y 24 se observa la propagación de las señales sintéticas en cada una de las boyas. Los resultados de dichas simulaciones se encuentran resumidos en las tablas 12, 13 y 14.

Figura 22 Mallas de cálculo empleadas en la modelación numérica con el MOST.
a) Malla externa A, b) malla intermedia B y c) malla de inundación C.

(a)



(b)



(c)

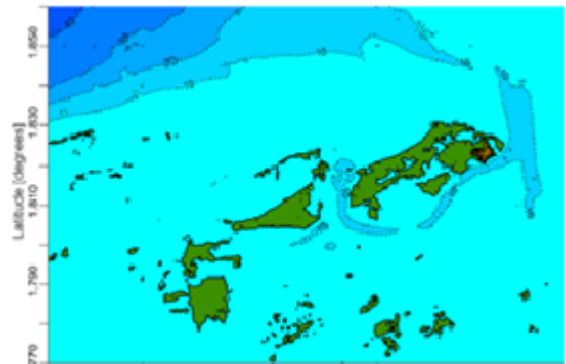


Figura 23. Señales sintéticas obtenidas con el sismo de 8.2 Mw con dos fallas activas paralelas a la zona de subducción del Pacifico entre Ecuador y Colombia.

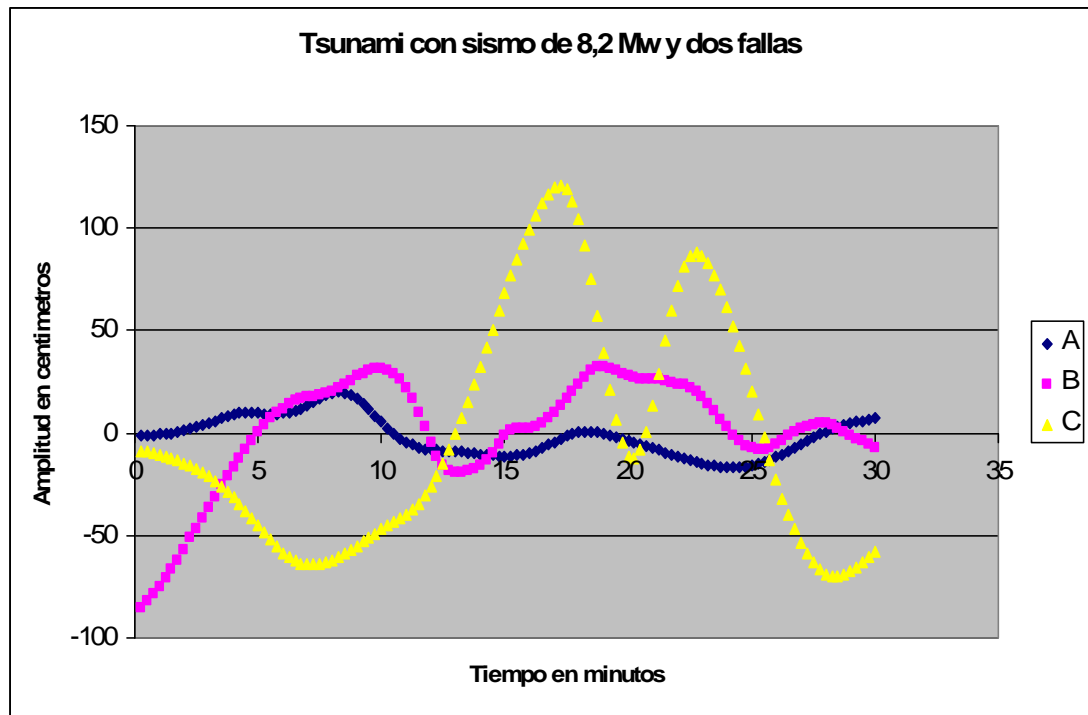


Tabla 12. Resultados de la simulación con 8.2 Mw con dos fallas. Fuente: Autor

Boya	Amplitud máxima (centímetros)	Amplitud mínima (centímetros)
A	19.881	-16.867
B	32.21	-85.042
C	120.91	-69.67

Figura 24. Señales sintéticas obtenidas con el sismo de 8.2 Mw con cuatro fallas activas paralelas a la zona de subducción del Pacifico entre Ecuador y Colombia

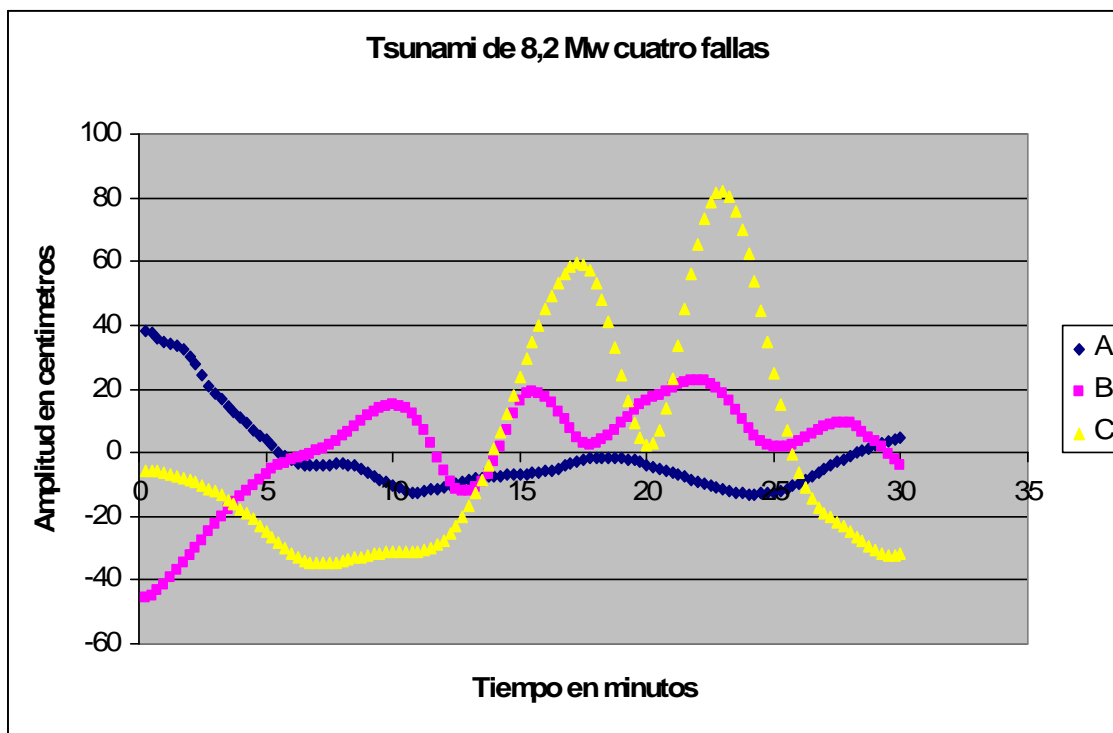


Tabla 13. Resultados de la simulación con 8.2 Mw con cuatro fallas.

Boya	Amplitud máxima (centímetros)	Amplitud mínima (centímetros)
A	38.25	-12.99
B	22.67	-45.78
C	82.136	-34.70

Figura 25. Señales sintéticas obtenidas con el sismo de 8.8 Mw con cuatro fallas activas paralelas a la zona de subducción del Pacifico entre Ecuador y Colombia.

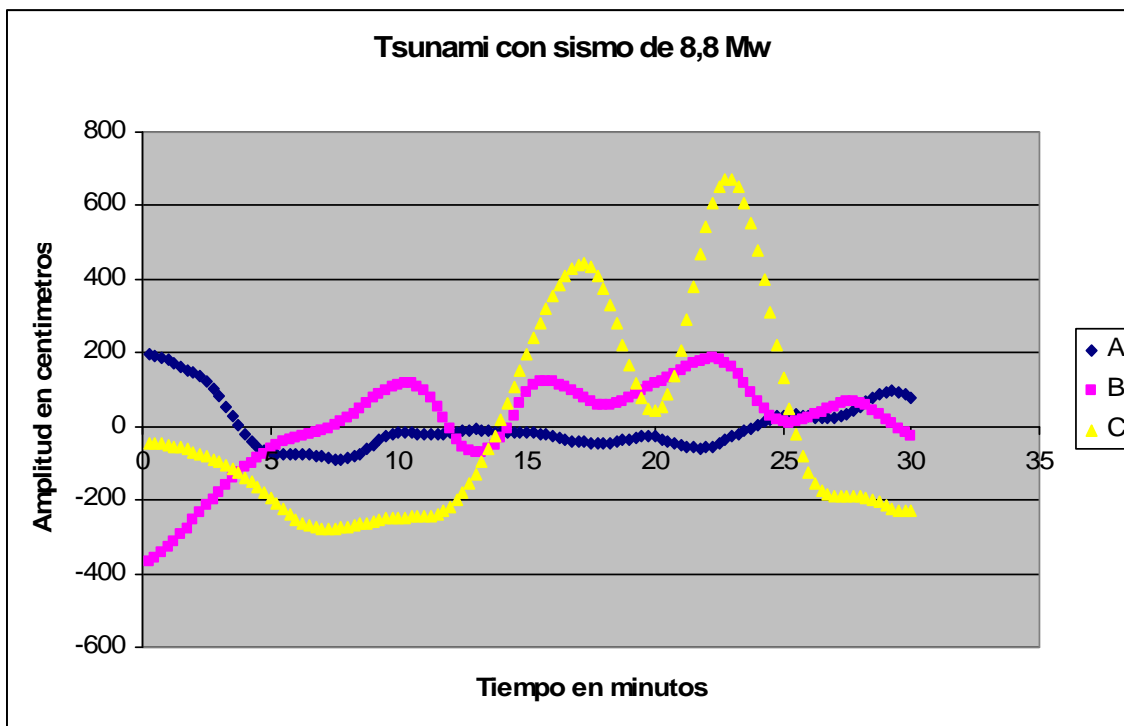


Tabla 14. Resultados de la simulación con 8.8 Mw con cuatro fallas activas.

Boya	Amplitud máxima (centímetros)	Amplitud mínima (centímetros)
A	197.029	-89.25
B	197.029	-369.71
C	673.239	-278.43

De acuerdo a los resultados obtenidos como producto de las tres simulaciones numéricas realizadas con el modelo numérico MOST se considera que la posición en la boya B correspondiente a la posición 1.8790 N de latitud y 79.1919 W de longitud es la que más rápidamente detecta la variación extrema en el nivel del mar, representada en descensos importantes en el nivel de marea desde los primeros 15 segundos.

En segundo lugar se encuentra la boya C, que pese a no presentar una gran diferencia de amplitud en comparación con los resultados obtenidos en la boya B, su amplitud si satisface las condiciones técnicas de detección del sistema de sensado. Por último se encontró la boya A que no logra alcanzar la variación mínima requerida por el sensor de presión en la primera simulación.

Sin embargo, pese a que la posición en la boya B refleja ser la más adecuada en términos de potencial de detección de olas tsunamis, en cuanto a las consideraciones técnicas de instalación no es una opción económicamente factible teniendo en cuenta que la mínima longitud de cable necesaria para realizar la conexión de los sensores en el fondo oceánico con los equipos de adquisición ubicados en la superficie es de 815 metros.

Por otro lado, el proceso de fondeado del sistema de sensado a esta profundidad se convertiría en una operación sumamente tediosa a causa de las consideraciones técnicas y económicas que implica el desarrollo de esta actividad.

Es por esta razón que se selecciona la posición de la boya C como punto de instalación del sistema remoto de sensado, ya que en esta posición además de ser capaz de identificar variaciones significativas en el nivel del mar aceptables, también posee una batimetría menos profunda de 100 metros que disminuye drásticamente los costos de técnicos de instalación y adquisición del cableado necesarios para sistema de sensado.

Para una mejor interpretación de los resultados encontrados en la posición de la boya C, se resume los valores obtenidos en las modelaciones numéricas. Se denomina como evento 1, a la modelación numérica con sismo de 8.2 Mw con dos fallas activas, evento 2 a la modelación numérica con sismo de 8.2 Mw con cuatro fallas activas y el evento 3 a la modelación numérica con 8.8 Mw con cuatro fallas activas paralelas a la zona de subducción. (ver tabla 15)

Tabla 15. Variaciones en amplitud detectadas en la posición de la boya C.

Parámetros	Evento 1	Evento 2	Evento 3
Amplitud máxima (centímetros)	120.91	82.136	673.239
Amplitud mínima (centímetros)	-69.67	-34.70	-278.43
Tiempo de arribo primera ola (minutos)	17.25	23	23
Amplitud primer dato observado (centímetros)	-9.06	-5.57	-44.26

3.2 EQUIPOS DE SENSADO DEL NIVEL DEL MAR

Los equipos SBE-50 y el SBE-37 son capaces de monitorear niveles de presión y han sido diseñados para ser incorporados dentro de sistemas de monitorización oceánica en profundidades de hasta 7000 metros. Estos dispositivos emplean un sensor de presión creado por Druck Industry los cuales consisten en una micro membrana de silicio en la que los elementos de tensión se implantan mediante técnicas de fabricación de semiconductores. A diferencia de los diafragmas de metal convencionales, la estructura de cristal de silicio es casi perfectamente elástica, por lo que la histéresis de presión es mínima.

El sensor SBE-54 ha sido diseñado para detectar específicamente niveles de presión de la columna de agua, este combina un transductor Paroscientific Digiquartz, un microcontrolador, un reloj de tiempo real con oscilador de cristal compensado por temperatura, una referencia de frecuencia compensada por temperatura y tres circuitos de adquisición de frecuencia de alta resolución. Este sensor posee además un mecanismo que permite monitorear el estado de la alimentación de voltaje y da aviso inmediato en caso de que la operación normal del sensor sea interrumpida. El SBE -54 posee una salida que representa la temperatura del sensor de presión la cual puede ser empleada para estimar la probabilidad del ruido de presión debido a los efectos dinámicos de la temperatura. Como la presencia de gradientes térmicos degrada el rendimiento del sensor, para minimizar estos gradientes el SBE-54 internamente realiza el proceso de insolación del housing y del resto de los equipos electrónicos.

Los niveles de presión son calculados usando los coeficientes de calibración almacenados internamente en una memoria EEPROM. La profundidad es calculada de forma autónoma en base a los valores de presión muestreados de acuerdo al tipo de agua seleccionada por el usuario ya sea agua salada (en el mar) o agua fresca (ríos). El periodo de muestreo de estos sensores es configurable por el usuario siendo el intervalo de muestreo por defecto de estos equipos 15 segundos. Los sensores SBE-37 y SBE-50 además de suministrar medidas de presión también son capaces de proporcionar valores de temperatura y conductividad de acuerdo a la configuración del usuario.

De esta forma el sensor es programado ingresando el tiempo de inicio del registro, el intervalo de muestreo de los datos y las características de los datos de salida que se quieren obtener. Posteriormente, el sensor es fondeado a una determinada profundidad en un periodo de tiempo máximo que depende de la programación previamente realizada y finalmente es desinstalado para realizar la descarga vía RS232 en el computador de los datos pertenecientes al registro instrumental. La programación de estos tres equipos se realiza a través del software SeaTerm el cual viene incluido en el paquete de compra de los sensores. (ver figuras 26 y 27)

Figura 26. Sensores de presión con los cuales se obtuvieron los registros mareales necesarios en la investigación y funciones de mantenimiento realizadas.
a) Sensor SBE-50, b) sensor SBE-37.

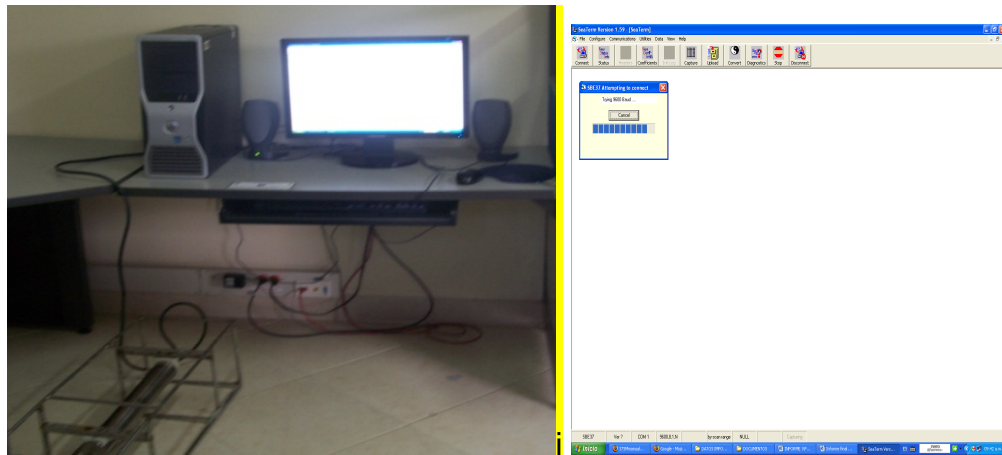
a.



b.



Figura 27. Programación del sensor SBE-37 y pantalla de configuración del software SeaTerm.



Aprovechando las características de los sensores descritas anteriormente, se realizó la selección del sensor SBE-37 en la fase inicial del proyecto para la obtención de los registros instrumentales empleados en el análisis y construcción del algoritmo computacional que permitirá la detección temprana de tsunamis de origen cercano, ya que este sensor cuenta con memoria y alimentación interna que permite el monitoréo de los niveles de presión al mismo tiempo que almacena los datos en memoria de forma autónoma de acuerdo a la configuración realizada por el usuario.

Para el diseño del sistema de alerta se seleccionó el sensor SBE-54 debido a la portabilidad y características funcionales tales como su alta inmunidad a los niveles de ruido externos e instrumentales, alto grado de resolución de datos comparado con los equipos SBE-50 y SBE-37, el detector automático de fallas producidas por deficiente nivel del voltaje de alimentación y interrupciones en la toma de datos. Este sensor es alimentado por baterías internas de larga duración y gran capacidad de almacenamiento de datos lo que lo hace adecuado para la instalación de sitios remotos como es el caso del presente proyecto. (ver tabla 16)

Tabla 16. Características principales de los sensores de presión

Características	SBE-37	SBE-50	SBE-54
Rango de medida	0 a 7000 metros	0 a 7000 metros	0 a 4000 metros
Precisión inicial	0,1% de la escala total del rango.	0,1% de la escala total del rango	0,1% de la escala total del rango
Resolución	0,002% de la escala total del rango.	0,002% de la escala total del rango	0.011 de la escala total
Memoria	Memória FLASH no volátil 2048 Kbytes	No posee.	Memoria flash de 128 Mbyte para 8.9 millones de muestras. Memoria EEPROM para almacenar los coeficientes de calibración.
Tipo de Alimentación	Paquete de baterías de litio de 9-24 VDC	Alimentación externa 8 a 30 VDC	Alimentación externa de 12 - 28 VDC.

Debido a las características anteriormente mencionadas, el sensor SBE-54 es conocido comúnmente en el mercado internacional como *tsunameter* (tsunamómetro en español), óptimo para ser incorporado en sistemas de alerta temprana por tsunamis. Teniendo en cuenta la profundidad de 100 metros de fondeo mínimo seleccionado para el sistema de sensado, se determinó la siguiente configuración y características de instalación del sensor.

Retomando el periodo de muestreo de 15 segundos empleado en la obtención del registro instrumental el porcentaje de resolución a escala completa es de $1,22e-51$ % (0.11 partes por millón).

3.2.1 Longitud del cable. La longitud del cable que el SBE-50 puede manejar para la transmisión de los datos en tiempo real depende de la velocidad de transmisión de los datos. Las combinaciones permitidas son indicadas en la tabla 18. (ver tabla 17)

Tabla 17. Longitudes de cable permitidas de acuerdo a la velocidad de transmisión de los datos.

Longitud máxima del cable (metros)	Máxima velocidad de transmisión (baudios)
1600	600
800	1200
400	2400
200	4800
100	9600
50	19200
25	38400

De acuerdo a la tabla 18, la máxima longitud de cable a la cual se puede transmitir datos correctamente es de 100 metros, teniendo en cuenta que la velocidad de transmisión de los equipos de telemetría tales como el radio módem UHF nos proporciona un mejor rendimiento a una velocidad de 9600 baudios de acuerdo a pruebas realizadas previamente con el sensor de presión SBE-50.

3.2.2 Relación potencia con la longitud del cable. Para encontrar la máxima longitud de cable que se puede emplear de acuerdo al voltaje de alimentación y al calibre de cable, se debe hallar primero el voltaje límite de alimentación, el cual es determinado multiplicando la resistencia límite de cable con el máximo valor de corriente requerido en la comunicación.

El nivel de corriente mínimo necesario para la transmisión de los datos de presión con el SBE-54 es de 0.225 Amperios. (ver tabla 18)

Tabla 18. Relación entre el calibre del cable y su correspondiente resistencia

Calibre del cable	Resistencia por pie ohms/pies
12	0.0016
14	0.0025
16	0.0040
18	0.0064
19	0.0081
20	0.0107
22	0.0162
24	0.0257
26	0.0410

De esta forma para una alimentación de 12 voltios suministrada por el sistema de alimentación fotovoltaico que se empleará en el sistema de alerta y un cable calibre 20, la resistencia límite del cable se determina de acuerdo a la ecuación (5). Donde se encontró el valor de la resistencia empleando un voltaje umbral de 1 voltio [33].

$$R_{\text{limite}} = V_{\text{limite}} / I = 1 \text{ voltio} / 0.225 \text{ Amperios} = 4.4 \text{ ohms} \quad (5)$$

$$\text{Máxima Longitud del cable} = 4.44 \text{ ohms} / 0.0107 \text{ ohms/pies} = 415 \text{ pies} = 126 \text{ m}$$

De acuerdo a estos resultados, se encuentra adecuado emplear en el diseño un cable de calibre 20 y longitud máxima de 126 metros para la instalación adecuada de los sensores de presión SBE-54 en la estación de sensado remoto representado por la boya en la posición C descrita en el capítulo anterior.

3.3 ANALISIS COMPARATIVO Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGIA DEL ENLACE INALÁMBRICO

Teniendo en cuenta el punto de instalación del sistema de sensado encontrado previamente, el cual se encuentra a una distancia de 25 kilómetros medidos a partir de la línea de costa del municipio de San Andrés de Tumaco, se debe diseñar un sistema de comunicación capaz de transmitir los datos correspondientes al nivel de marea capturados por el sensor de presión, a la estación receptora ubicada en las instalaciones del Centro de Alerta Temprana (CAT) ubicada al interior de las instalaciones de la DIMAR-CCCP en San Andrés de Tumaco.

Los datos que serán transmitidos de forma bidireccional provienen de un sensor de presión fondeado directamente debajo de una boya a una profundidad mínima de 100 metros. Se deben transmitir siete caracteres que representan un valor de la presión medida en la profundidad antes mencionada con un intervalo de muestreo de 15 segundos.

El sistema de comunicación empleado para un sistema de alerta temprana debe tener un alto grado de estabilidad y eficiencia, es por esta razón que la transmisión de los datos de presión deben ser enviados al CAT de forma redundante empleando dos medios de transmisión de datos inalámbrica diferentes y emitiendo los datos dos veces, lo cual concuerda con los lineamientos expresados en la lista de comprobación de sistemas de alerta temprana formulado por la UNESCO en el 2008.

3.3.1 Evaluación de parámetros generales:

3.3.1.1 Impacto ambiental y urbanístico. Dado el tamaño reducido de los equipos y la infraestructura, estos no representan una gran incidencia para el medio ambiente y el espacio urbano, ya que la transmisión de la información se realizará en dos puntos donde no están habitados por personas y la incidencia ambiental es casi nula como es el caso de la edificación del faro y la boya que será instalada en el mar.

3.3.1.2 Cobertura. Como se mencionó antes, la transmisión de los datos de presión se realizará desde un punto a 25 kilómetros de la línea de costa del municipio de Tumaco, siendo una posible solución desde el punto de vista de cobertura cualquiera de las tecnologías descritas en la tabla 19.

Tabla 19. Alcance máximo de las principales tecnologías de comunicaciones inalámbricas.

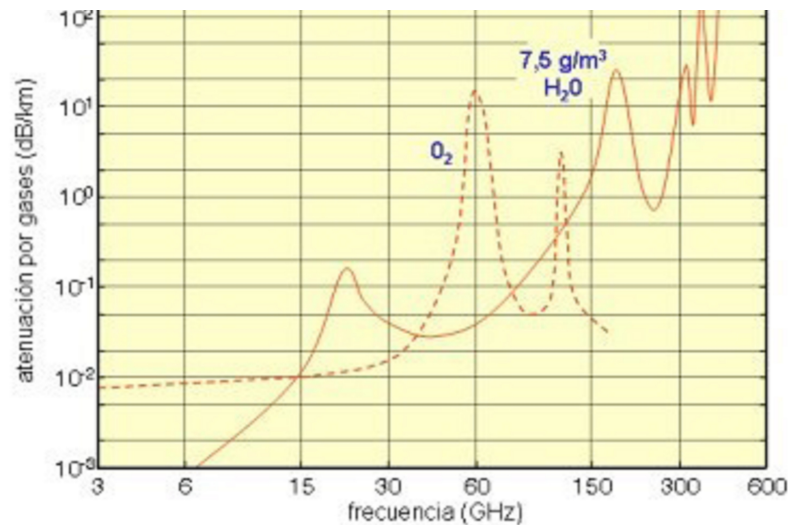
Tecnología	Frecuencia de operación	Distancia máxima (km)
HF	3-30 MHz	250
VHF	30 -300 MHz	160
UHF	300 MHz-3 GHz	100
Satelital	Microondas	Ilimitada

3.3.1.3 Afectación meteorológica. Los equipos de comunicaciones presentan un rango de operación recomendado en cuanto a factores meteorológicos (precipitación, humedad relativa, temperatura, descargas eléctricas, entre otros), ya que estos pueden verse gravemente afectado por estos factores. La costa pacífica colombiana tiene una altura promedio de tres metros sobre el nivel del mar, con una temperatura promedio de 26 °C y una humedad relativa en el rango de 85%. Los enlaces por microondas se ven afectados por la lluvia y condiciones climáticas adversas en función de la frecuencia de operación de los equipos. Es así como el desvanecimiento de la señal es mayor para los sistemas LMDS (28 GHz) que para los sistemas WI-FI (2,4 o 5,8GHz), lo que se relaciona directamente con la pequeña longitud de onda que presentan las señales en estas frecuencias y el tamaño de las partículas correspondientes a los fenómenos meteorológicos como la lluvia.

3.3.1.4 Atenuación por gases atmosféricos. Este es un fenómeno atmosférico que se encuentra muy presente en zonas marítimas debido a la evaporación del agua del mar. Los vapores de agua y de oxígeno no condensados presentan una importante absorción a determinadas frecuencias. Debido a esto existen frecuencias en el rango de las microondas que experimentan una fuerte atenuación frente a otras que no causan tanto este efecto, además, la atenuación producida por estos gases atmosféricos es aditiva.

Como se puede observar en la siguiente gráfica por debajo de los 15 GHz la atenuación introducida es despreciable (mucho menor que 1 dB/Km.) (ver figura 28)

Figura 28. Relación existente entre el rango de frecuencia y la atenuación



3.3.1.5 Conductos por evaporación de agua. Debido a la evaporación del agua de la superficie marina, existe a menudo una región sobre esta donde se produce un rápido cambio de la humedad, el cual causa una variación descendente del índice de refracción con la altura más acusado de lo normal. A esta región se le denomina *conducto*, y este cambio en el índice de refracción puede provocar que las ondas que viajan dentro del conducto describan una curva hacia la superficie terrestre en donde se reflejarán, produciéndose un efecto guía onda que puede llevar a alcanzar unas distancias de propagación mucho mayores con respecto a los mecanismos de propagación normal de la onda.

3.3.1.6 Brisa marina. La brisa marina varía las condiciones de refractividad de la atmósfera, estas variaciones llevan a una modificación del trayecto de las ondas propagadas, lo que afecta a la calidad de los radioenlaces. La brisa marina es un fenómeno local, su patrón de intensidad es diferente en cada localización a causa de las diferencias de latitud, temperatura, topografía y otras circunstancias.

3.3.1.7 Ancho de banda y capacidad de transmisión. El ancho de banda es la diferencia entre las frecuencias máxima y mínima que soporta el sistema de comunicaciones. La capacidad de información es una medida de cuanta información se puede transferir de un sistema de comunicaciones en un determinado tiempo. La cantidad de información que se puede propagar en un sistema de transmisión es una función del ancho de banda y del tiempo de transmisión. (ver tabla 20)

Tabla 20. Tecnologías de enlace inalámbricas con la tasa de transmisión máxima que soportan.

Tecnología	Velocidad máxima de transmisión
HF	9600 bps
UHF	75 Mbps
VHF	54 Mbps
Satelital	492 kbps

3.3.1.8 Costos. Es la inversión que se debe realizar para la adquisición, instalación y mantenimiento del sistema de comunicaciones. Incluye también costos de arrendamiento y permisos que se necesiten para operar el enlace. Para el escenario de operación de éste proyecto, puesto que no se aplica a una distribución de servicios pagada por los usuarios, la recuperación de la inversión se verá reflejada en el beneficio que genere para la comunidad. .

Se deben tomar en cuenta los costos de personal a cargo de las labores de diseño de red, instalación del sistema, administración de los recursos de red, capacitación a los técnicos y usuarios, control del acceso físico y mantenimiento de la red.

3.3.1.9 Licencias. Se aplica para medios inalámbricos donde existen según la regulación del Ministerio de Comunicaciones, bandas libres y bandas licenciadas. Este es un parámetro muy importante porque con el espectro licenciado se incurre en un costo adicional para la operación del equipo. En tanto que trabajar en espectro libre implica exposición a interferencias y saturación de canales de frecuencias.

3.4 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL ENLACE

Para el diseño del sistema de comunicaciones redundante requerido para el sistema electrónico de alerta temprana se seleccionó la tecnología Packet Radio en la banda de frecuencia UHF y la comunicación satelital.

Se empleo la banda de frecuencia UHF debido a las siguientes características: los módem que se emplean para la transmisión de datos poseen un bajo costo adquisitivo, funcionan en frecuencias libres no licenciadas, las perdidas en el espacio libre son relativamente bajas a causa de la baja incidencia que tiene la atenuación por gases atmosféricos en esta frecuencia de operación. Además la velocidad de transmisión a la cual operan los equipos necesarios para la

transmisión, es fácilmente adaptada a la configuración adecuadamente con los equipos de sensado que se emplearán en la detección del nivel del mar.

Por otro lado con la finalidad de verificar las características funcionales de este tipo de transmisión se realizó la implementación de un radioenlace terrestre UHF entre la edificación “el faro” ubicada en las instalaciones de la DIMAR en la base naval el “Morro” en Tumaco y el Batallón 70 ubicado en la isla el morro en Tumaco, con una distancia punto a punto de 2.09 kilómetros. En el radioenlace se emplearon dos radio módem MHX-910 A, adquiridos por la entidad en investigaciones anteriores.

Cabe destacar que aunque las características de la transmisión realizada no representan factores extremos en cuanto a la distancia entre puntos, si permitió validar la capacidad del software Radio Mobile que fue seleccionado para la simulación del sistema de comunicación necesario en el presente proyecto, manifestando un alto grado de aproximación entre los resultados. (Anexo 1).

La comunicación satelital pese a tener un alto costo de operación ofrece una gran variedad de ventajas sobre las otras tecnologías, como son una alta tasa de transmisión de datos, su alcance de transmisión entre puntos es prácticamente ilimitada, no requiere de línea de vista directa entre puntos de comunicación, la posible presencia de pérdidas de datos es casi nula lo que la hace un medio de transmisión de datos idóneo para el sistema de alerta temprana. Además de los beneficios mencionados anteriormente, la comunicación satelital puede ser aplicada para el funcionamiento de múltiples servicios actuales.

Cabe resaltar, que el diseño del sistema de comunicación no se limita a la instalación del sistema a la población del municipio de Tumaco, si no que está pensada para ser instalada en el futuro en otras regiones aplicando la metodología desarrollada en este proyecto, este fue otro de los motivos por los que se decidió optar por la comunicación satelital.

3.4.1 Identificación de los sitios de emplazamientos:

3.4.1.1 Estación transmisora o remota. La estación desde donde se realizará la transmisión de los datos, es una boya instalada a una distancia de 25 kilómetros medidos desde la línea de costa de San Andrés de Tumaco. En esta estación se encuentra fondeado un sensor de presión a una profundidad de 100 metros medidos desde la superficie del mar. El sensor de presión es el encargado de registrar los datos del nivel del mar que serán enviados vía inalámbrica al CAT, donde son analizados para detectar posibles variaciones extremas. La altura de la boya donde serán instalados los equipos de transmisión es de tres metros medidos a partir de la superficie del mar y con un diámetro de dos metros.

Una de las consideraciones más relevantes en la elección del punto de instalación de la antena es la línea de vista con relación a las variaciones del nivel del mar, es decir, como se puede ver afectada vertical y/o horizontalmente la posición de la antena con respecto al movimiento de la boya producido por el oleaje. El nivel de marea alto y nivel de marea bajo a una distancia de 25 kilómetros de la bahía de Tumaco es casi imperceptible lo que lo convierte en un factor insignificante dentro del diseño del sistema de comunicación.

3.4.1.2 Estación repetidora. La estación receptora se instalará en la torre del faro ubicada al interior de las instalaciones de la Dirección General Marítima en Tumaco, la cual cuenta con las condiciones idóneas para el emplazamiento al encontrarse a solo 20 metros de la estación maestra. Las características generales se presentan en la tabla 21. Vale la pena aclarar que el uso de esta estación, no se debe al rango de cobertura que se debe cubrir, si no debido a que línea de vista entre la estación receptora y la estación transmisora se encuentra físicamente obstruida debido a la altura del cerro donde se encuentra construida la edificación que servirá de estación receptora. (ver figuras 29,30) y (ver tabla 21)

Figura 29. Edificación “El Faro” ubicada al interior de la DIMAR-CCCP en Tumaco.



Tabla 21. Características de la estación Repetidora

Características de la Estación Faro	
Latitud	1° 49' 22.9076'' N
Longitud	78° 43' 39.4956'' W
Altura del cerro sobre el nivel del mar	94 metros
Altura de la edificación	12 metros
Altura mástil	4 metros
Altura. Total	110 metros

Figura 30. Instalaciones de la Dirección General Marítima en San Andrés de Tumaco donde se indica la estación receptora (CAT) y la estación repetidora (Faro).



3.4.1.3 Estación Maestra o terrestre. Esta estación es el destino final de los datos provenientes del sensor de presión y es aquí donde se realizará la adquisición, análisis y procesamiento de la información. La estación maestra es el CAT (Centro de Alerta de Tsunami), ubicado en el centro de investigaciones Hidrográficas y Oceanográficas del Pacífico- CCCP al interior de las instalaciones de la DIMAR en Tumaco.

3.5 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

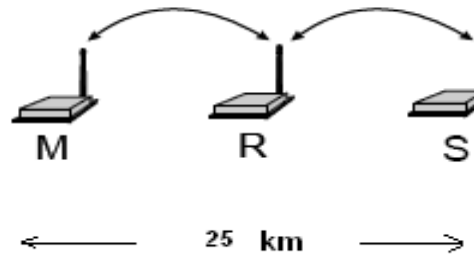
3.5.1 Comunicación en la banda de frecuencia UHF. La propagación en UHF está sujeta principalmente a fenómenos de reflexión, propagación multitrayecto, refracción y difracción, cuyo alcance máximo se aproxima a los 100 kilómetros. Como el alcance de transmisión de datos necesario en el presente diseño es de 25 kilómetros, resulta adecuado realizar un enlace punto a punto directo entre la estación remota y la estación repetidora, siendo esta la mayor distancia a cubrir dentro del enlace.

Estación maestra: Un radio modem Serial Spread Spectrum UHF. Referencia MHX 910 A con frecuencia de operación 900 MHz, una antena Yagi marca UNITEL Referencia UAN-900 ganancia de 12dBi, cable coaxial LMR-400 con conectores RP-TNC para la conexión del radio modem a la antena, Cable DB9 – RS232 (conexión modem-DTE), sistema de alimentación fotovoltaico con fuente cargador regulable y batería externa de respaldo, sistema de puesta a tierra y un computador para la adquisición y procesamiento de los datos.

Estación repetidora: Una antena omnidireccional de 12 dbi de ganancia, un radio modem Serial Spread Spectrum UHF Referencia MHX 910 A con frecuencia de operación 900 MHz, sistema de alimentación fotovoltaico, cable coaxial LMR-400 con conectores RP-TNC para la conexión del radio modem a la antena, un mástil para instalar la antena de dos metros.

Estación Remota: un radio modem MHX 910 A, antena yagi de 12 dbi de ganancia, sistema de alimentación fotovoltaico, cable coaxial LMR-400 con conectores RP-TNC para la conexión del radio modem a la antena, cable para la conexión entre el sensor de presión y el radio modem, circuito para monitoreo de carga y protección de batería, una caja NEMA 4X para los equipos y un mástil de altura variable (tres a cinco metros) para la antena. (ver figura 31)

Figura 31. Configuración del enlace UHF.



Simulación del radio enlace UHF con Radio Mobile: Para el desarrollo de la simulación se emplearon los parámetros reales del sistema de comunicación diseñado, los cuales se encuentran consignados en la tabla 22, en donde se indican las características de entorno utilizados para estimar la eficiencia del radioenlace. Estos valores fueron ingresados en la ventana “Propiedades de Redes” del menú “Archivo” de la aplicación, en la ventana de parámetros. (ver figuras 32 y 33)

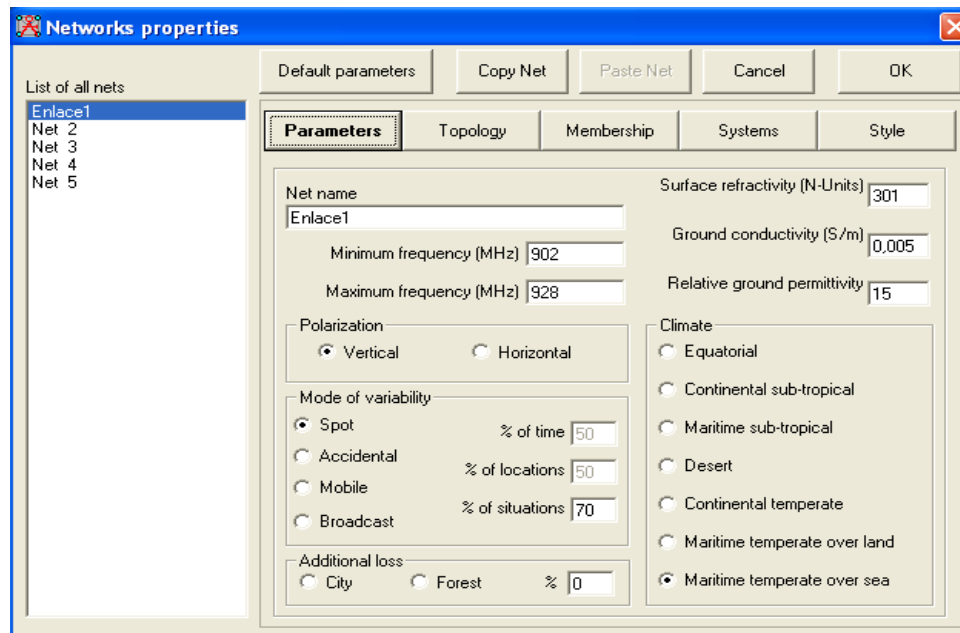
Figura 32. Puntos de instalación de las estaciones en Radio Mobile



Tabla 22. Parámetros utilizados en la simulación de los radioenlaces

Parámetro	Valor
Coordenadas punto central mapa	01°50'00"N 79°11'00"O
Ancho del mapa	100 Km
Rango de frecuencia de operación	902-928 MHz
Topología	Red de Datos
Polarización	Vertical
Modo variabilidad	Fijo
Polarización	Vertical
Pérdida adicional	Ninguna
Refractividad de la superficie	301 (Unidades – N)
Conductividad del Suelo	0,005 (S/m)
Permitividad relativa	15
Clima	Temperatura Marítima sobre el mar

Figura 33. Ventana de Propiedades de las Redes de Radio Mobile.

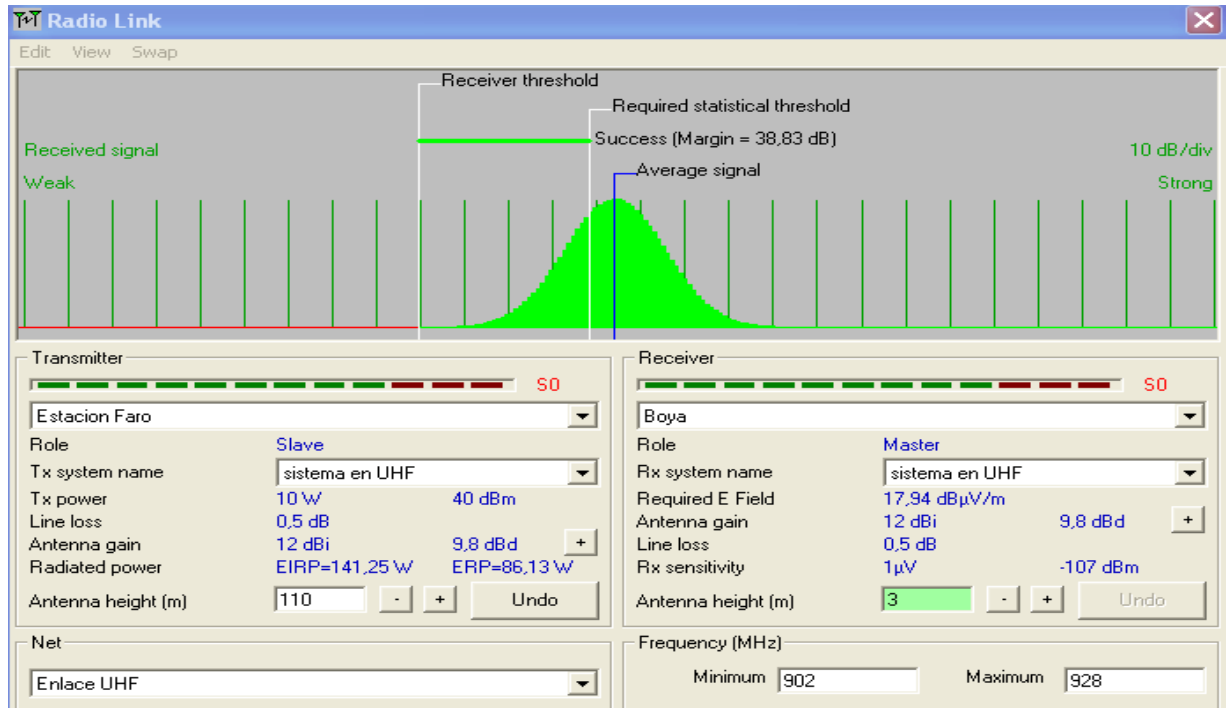
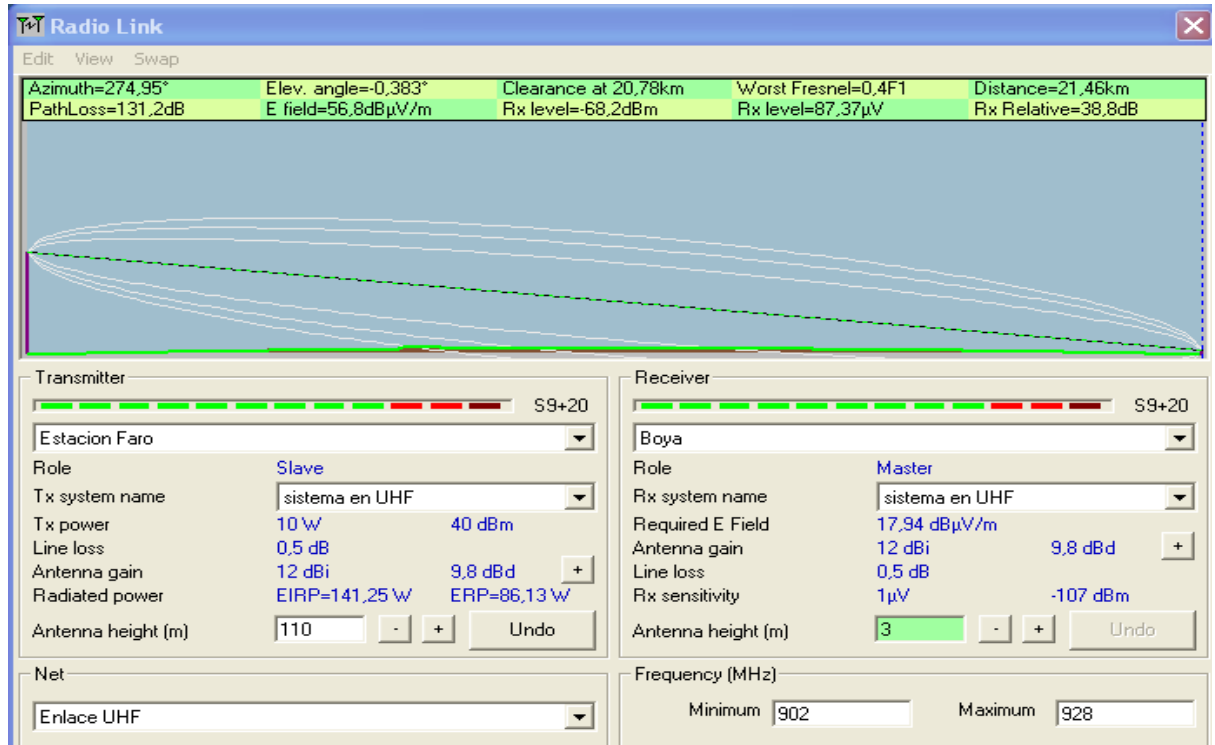


Los resultados obtenidos en el cálculo realizado por el simulador aparecen en la tabla 23, en donde se puede observar un nivel aceptable de pérdidas de propagación en el espacio libre y un óptimo despeje mínimo de la zona de Fresnell.

Tabla 23. Resultados del cálculo de radio enlace con Radio Mobile

PARÁMETROS	Estación receptora FARO	Estación transmisora BOYA
Potencia de transmisión	30 dBm	30 dBm
Sensibilidad	-82dBm	-82dBm
Ganancia de la Antena	12 dBi	12 dBi
Azimut Verdadero	274,4°	256,42°
Ángulo de elevación antena	-3.76	3.74°
Pérdida en la línea	0.5dB	0.5dB
Altura de la antena sobre el nivel del mar	110m	3 m
Altura de la antena sobre el sitio de emplazamiento	100m	3 m
Distancia entre sitios	25 Km	
Mínimo Despeje Zona de Fresnel	0.4 F1 en 20 km	
Pérdida de Espacio Libre	119.4 dB	
Pérdida por Obstrucción	-3.4 dB	
Pérdida por entorno Urbano	9.7dB	
Pérdidas por variabilidad	-0.8dB	
Pérdida de propagación total	130.9 dB	
Ganancia del Sistema	170 dB	
SOM	26,7dB	

Figura 34. Perfil orográfico, rango y distribución de la señal de transmisión entre la estación maestra y la estación repetidora. Fuente: Autor



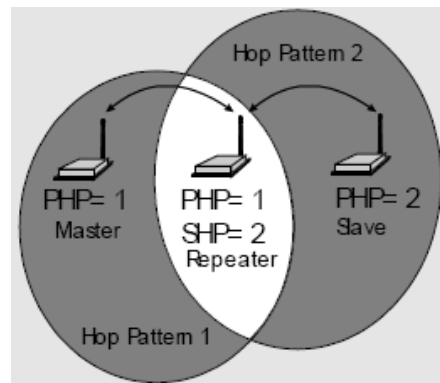
Configuración de los radio módem MHX 910 A: El modo de operación que se empleará es de tipo punto a punto, en donde la comunicación entre el módem esclavo y el módem maestro se realizará a través de un otro configurado como repetidor. El sistema se ha programado a una tasa de baudios de 9600 al igual que el sensor de presión que será conectado al modem maestro, velocidad a la cual el sistema mostró un mejor rendimiento durante las pruebas desarrolladas.

Se configuró un intervalo de salto de 45 ms obteniendo de esta forma un throghput de 68 Kbsps y un tamaño de paquete de 174 bytes. Teniendo en cuenta el comportamiento funcional del algoritmo computacional diseñado para la detección de variaciones extremas en el nivel del mar se programó el sistema de tal forma que el envío de datos se haga de manera continua y no en forma de tramas.

El modem configurado como repetidor debe ser capaz de pasar la información desde una estación máster a una estación esclava (receptora). El repetidor también actúa como esclavo, es decir, es capaz de transmitir información hacia o desde el puerto serial. En la figura 23 se observa los patrones de salto empleados en una comunicación de tipo punto a punto a través de un repetidor, donde se emplean dos patrones de salto, primario y secundario. En el patrón de salto primario se establece la comunicación Máster - Repetidor, y en el salto patrón secundario se establece la comunicación Repetidor -Esclavo.

Cuando existen repetidores adicionales entre un repetidor y el maestro la comunicación se realiza en el salto patrón primario (PHP) y cuando existen repetidores adicionales entre el repetidor y el esclavo se emplea el salto de patrón secundario (SHP). (ver figura 35)

Figura 35. Patrones de salto empleados en una comunicación con repetidores.



Como el MHX 910 A es un módem de salto de frecuencia, este realiza cambios periódicos de frecuencia de acuerdo a 64 patrones de salto pseudoaleatorios,

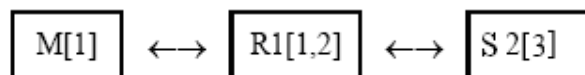
definidos por el PHP y el SHP. Los valores de entrada validos son de 0 a 63. En la (tabla 24), se observa una guía para la selección adecuada de los patrones de salto. Hay 31 patrones de salto en el grupo A y 31 en el grupo B.

Tabla 24. Relación entre los patrones de salto y el espectro de frecuencia usado

	Pattern Number	Spectrum Used
Group A Patterns 0,2,4...60	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12	902.4 - 927.6 MHz
	14, 16, 18, 20	905.2 - 924.8 MHz
	22, 24, 26, 28	908.0 - 927.6 MHz
	30, 32, 34, 36	902.4 - 907.2, 913.2 - 927.6 MHz
	38, 40, 42, 44	902.4 - 912.4, 918.4 - 927.6 MHz
	46, 48, 50, 52	902.4 - 917.4, 923.6 - 927.6 MHz
	54, 56, 58, 60	902.4 - 922.0 MHz
Group B Patterns 1,3,5...61	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13	902.6 - 927.4 MHz
	15, 17, 19, 21	905.4 - 925.0 MHz
	23, 25, 27, 29	907.8 - 927.4 MHz
	31, 33, 35, 37	902.6 - 907.4, 913.0 - 927.4 MHz
	39, 41, 43, 45	902.6 - 912.6, 918.2 - 927.4 MHz
	47, 49, 51, 53	902.6 - 917.8, 923.4 - 927.4 MHz
	55, 57, 59, 61	902.6 - 922.2 MHz

La figura 36 indica la forma como se realizó el establecimiento de la comunicación de la red diseñada. Donde se emplea la designación M [a] Rx [a, b] y Sx[a], donde M indica máster, S esclavo, R repetidores, x es la unidad de dirección, a es el patrón de salto primario y b el patrón de salto secundario. (ver figura 36)

Figura 36. Configuración punto a punto con repetidor.



El tamaño máximo y mínimo de los paquetes que serán transmitidos son programados en la estación máster. La estación repetidora es configurada a través del registro S114=0 el cual corresponde a el registro de control de paquetes donde se le ordena al repetidor seguir la programación de paquetes desde el esclavo. Con ayuda del analizador de espectro es posible observar la potencia de la señal emitida y permitiendo de esta forma determinar las partes donde la banda ISM es menos ruidosa, esto con el fin de seleccionar apropiadamente el patrón adecuado de salto. Cabe resaltar que se considera un alto nivel de ruido a valores por debajo de los -25dBm. (ver figuras 37 y 38)

Figura 37. Imagen correspondiente al análisis de espectro obtenido en el radioenlace implementado Faro-Batallón 70.

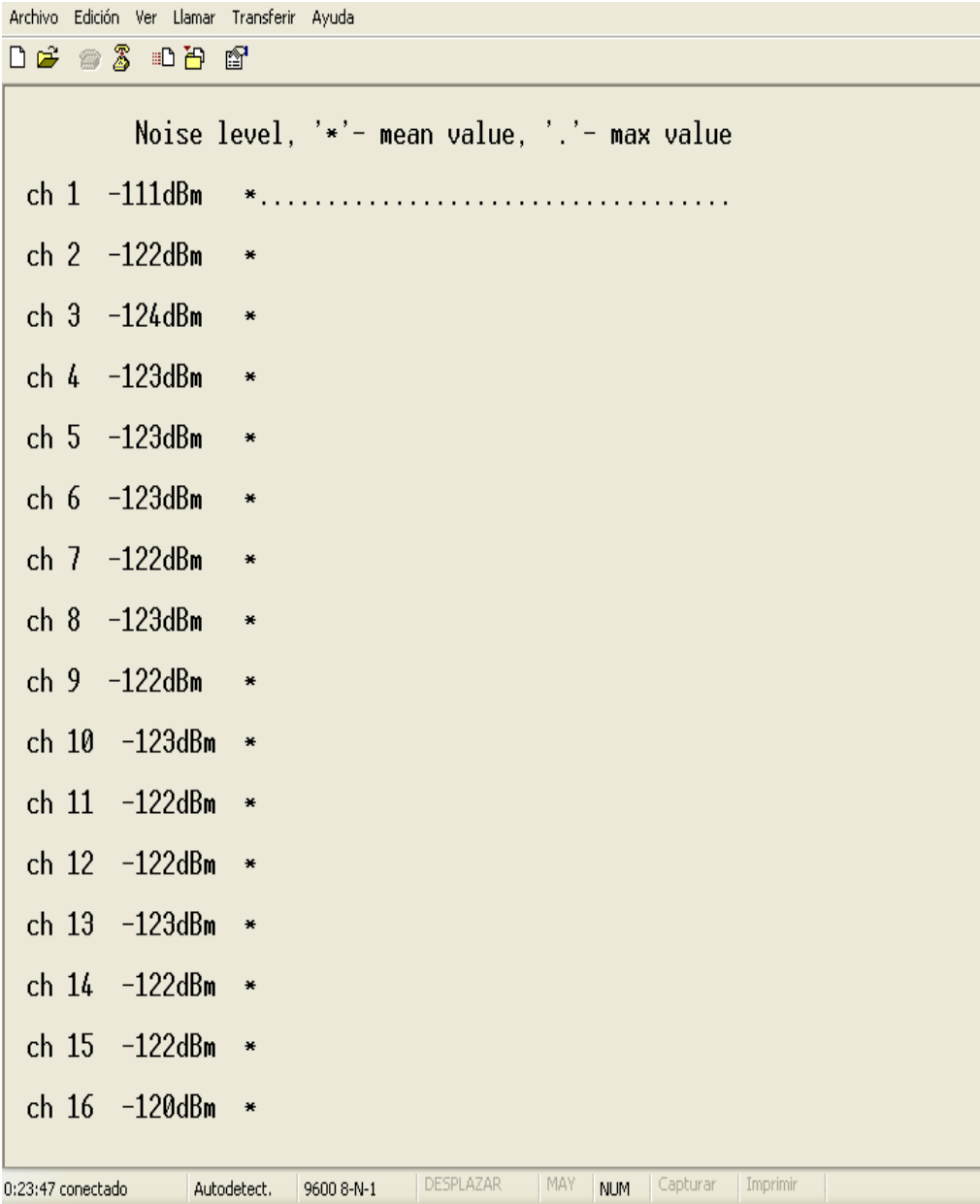
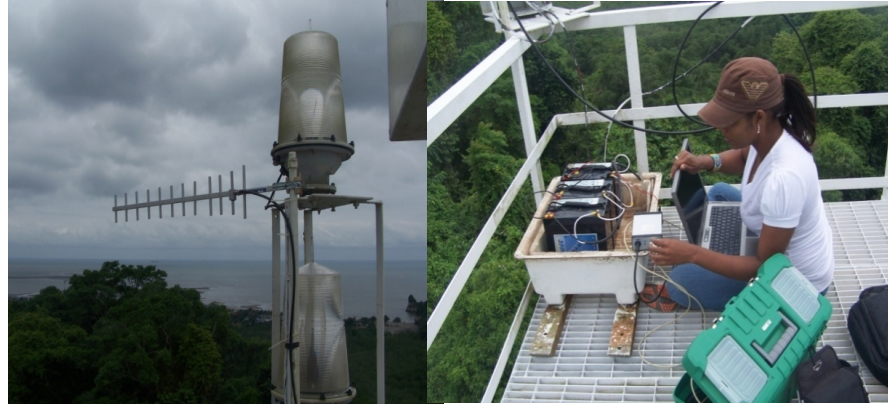
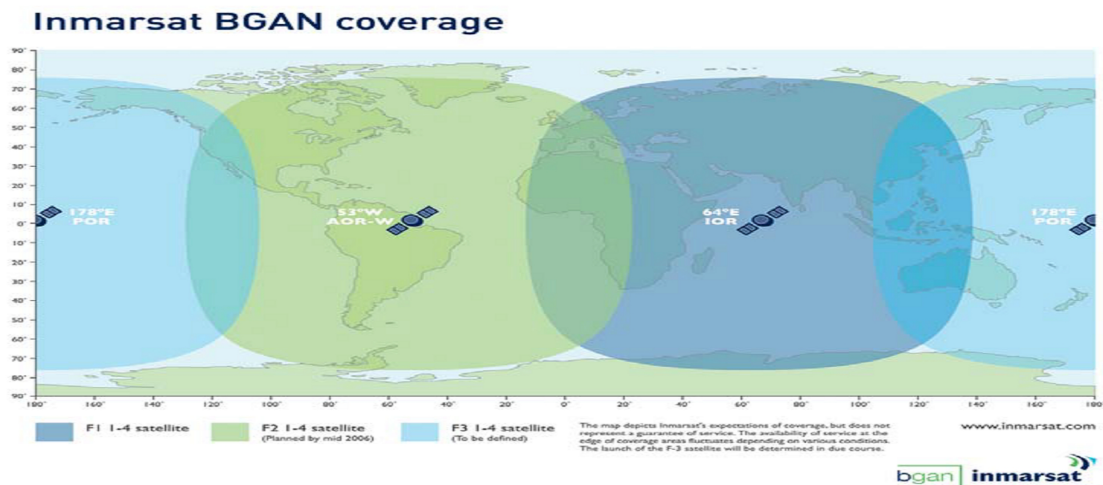


Figura 38. Instalaciones de prueba del sistema de comunicación UHF desde la edificación el Faro en las instalaciones de la DIMAR en Tumaco.



3.5.2 Comunicación satelital. En el caso de un terremoto las primeras pérdidas se presentan a menudo en las conexiones móviles telefónicas, en la red telefónica pública conmutada y en el suministro de energía eléctrica. En virtud de estas circunstancias, la comunicación por satélite es prácticamente la única opción fiable para adoptar en transmisión de datos correspondientes a los niveles de presión, empleando un sistema de alimentación ininterrumpida, como es el caso del sistema fotovoltaico que se utilizará en diseño del sistema de alerta temprana. (ver figura 39)

Figura 39. Mapa de cobertura del sistema BGAN.



El sistema BGAN de Inmarsat ofrece la transmisión de datos vía satelital con velocidades de hasta 490 Kbps la cual puede ser empleada para la transmisión en tiempo real de los datos de presión desde la estación remota en el mar hasta la estación terrestre. Con este sistema es posible la comunicación por medio del servicio de mensajes cortos SMS, y telefonía VOIP (Voice over IP). Este sistema proporciona disponibilidad de los datos en la estación terrestre inmediatamente el dato es registrado por los sensores de presión. (ver tabla 25)

Teniendo en cuenta las características de instalación del sistema de sensado, donde se refleja condiciones adversas que pueden afectar el optimo funcionamiento de los equipos, se empleará como equipo terminal para la comunicación satelital el HNS9201 BGAN, el cual posee una estructura en fibra de vidrio que lo hace prácticamente inmune bajo estas condiciones. Lo cual garantiza su buen funcionamiento una vez instalado en la estación remota. (ver figura 40)

Figura 40. Equipo terminal para comunicación satelital HNS9201 BGAN.



Tabla 25. Principales características del sistema HNS9201 BGAN.

Parámetros	Descripción
Velocidad máxima transmisión	492 Kbps envío y recepción
Interfaz	USB, Ethernet, 802.11 b Punto de acceso WLAN
Sistema operativo	Windows, Linux, MAC:OS
Servicio de datos	IP estándar, SMS, Datos ISDN
Fuente de alimentación externa	20 VDC, 110-240 VAC
Voltaje de entrada	11.1 VDC
Potencia radiada Máxima PIRE	30Dbw

Aunque en la transmisión de los datos vía satélite se pueden emplear diferentes bandas de frecuencia tales como Banda L (1-2 GHz), la banda C (8.4 GHz), la banda Ku (10-18 GHz) y la banda Ka (18-40 GHz), para el desarrollo de este proyecto se seleccionó la banda de frecuencia L, ya que pese a no ser la banda con mayor velocidad es la que menos sufre condiciones de atenuación por lluvia y el tamaño de la antena que emplea es razonable al igual que el consumo de potencia.

3.6 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN FOTOVOLTAICO

Debido a que los sistemas de alerta temprana deben garantizar el funcionamiento continuo de los equipos que hacen parte de él, es decir, debe funcionar sin ningún tipo de interrupciones, se debe emplear fuentes de alimentación independientes a la que es suministrada por redes de estaciones eléctricas, ya que de presentarse un fenómeno natural como es el caso de los tsunamis, es casi inevitable que este sistema sufra algún tipo de averías o sea interrumpido voluntariamente. Es por esta razón que se adoptan sistemas de alimentación autónomos como son los de tipo fotovoltaico.

3.6.1 Requerimientos del sistema de alimentación. Teniendo en cuenta las características eléctricas de los equipos y dispositivos que hacen parte del diseño del sistema, se determinará el tiempo de autonomía que garantizará el óptimo y continuo funcionamiento del sistema, siendo este un parámetro fundamental en el desarrollo de un sistema de alerta temprana por tsunami. (ver tabla 26)

Tabla 26. Características eléctricas de los equipos.

Característica	Sensor SBE-50	Sensor SBE-54	Modem UHF	Modem Satelital	Tarjeta de desarrollo
Voltaje de alimentación	12 V	12 V	12 V	20 V	12 V
Consumo de corriente	43 mA	225 mA	450 mA	50 mA	200 mA
1.2* Consumo de corriente	51.6 mA	270 mA	540 mA	60 mA	240 mA
Potencia consumida (w)	0,6192	2.7	5.4	1	2.4
Horas de trabajo	24	24	24	24	24
Potencia (w/h)	14,856	64.8	129,6	24	57,6
Potencia total (w/h)	290,856				

3.6.2 Paneles solares. Empleando los datos consignados en la tabla 28, se halla que el consumo total de corriente por día de la siguiente forma:

$$\text{Corriente total (It)} = (1161,6 \text{ mA}) * 24 \text{ horas} = 27,8784 \text{ Ah} \quad (5)$$

Como el sistema de alimentación de voltaje que suministrara energía a la estación remota instalada a 25 kilómetros del municipio de Tumaco es de tipo fotovoltaico es necesario conocer la capacidad de radiación solar promedio de la zona. Según el IDEAM el municipio de Tumaco tiene una radiación solar y brillo solar por día de

4.67 horas diarias en promedio. Obteniendo una radiación promedio incidente de los paneles solares determinado por la siguiente relación:

$$(1.2) * 4.66 = 5.592 \text{ horas (6)}$$

Como es necesario compensar posibles pérdidas de potencia debida a las conexiones necesarias del sistema de alimentación, se estima un porcentaje de pérdidas de 20%, se obtiene un total de 349,0272 W-h.

$$349,0272 \text{ W-h} / 5,592 \text{ h} = 62.415 \text{ W (7)}$$

De esta forma se estima que para poder proporcionar un buen suministro de potencia al sistema de telemetría instalado en la estación remota se debe emplear un modulo de valor nominal igual a 68 W.

3.6.3 Baterías. Para garantizar que la batería de 20 V tenga un buen periodo de vida útil y no sufra daños por descarga total, se debe prever que la batería solo use el 70% de su capacidad. Por lo tanto, la carga diaria nominal requerida es de:

$$290,856 \text{ W-h} / (12\text{V} * 0,7) = 20.77 \text{ Amperios-hora (8)}$$

Un sistema con una sola de estas baterías no sería confiable porque la carga almacenada serviría para proporcionar la energía demandada solo en días en que la radiación solar fuera suficiente para satisfacerla.

Debido a que no todos los días contarán con una radiación solar aceptable, la energía generada no será la suficiente para alimentar los equipos eléctricos durante la noche. Como mecanismo de precaución es necesario tener carga extra almacenada para prevenir esos periodos con bajos niveles de radiación.

3.6.4 Regulador de carga. De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que empleando módulos solares de 20 V se consigue una corriente de aproximadamente de 4 amperios, con lo cual se logrará emplear cómodamente un regulador de 5 amperios.

Por otro lado, como el regulador debe proteger a las baterías de una posible descarga se puede calcular que a la salida del mismo maneje una corriente máxima de $290,856 \text{ W} / 20\text{V} = 14.54$ Amperios, siendo aconsejable emplear un regulador de 20 a 30 Amperios de descarga.

3.7 DISEÑO DE LA BOYA

Para el diseño de la boya es importante tener en cuenta los requerimientos más relevantes del sistema de alerta temprana por variaciones extremas en el nivel del mar, estos son el sistema de comunicación a emplear, la fuente de alimentación del sistema, la adecuada instalación de los equipos necesarios para el sistema telemétrico y las condiciones ambientales hostiles en las cuales se encontrará instalado el sistema. (ver figura 41)

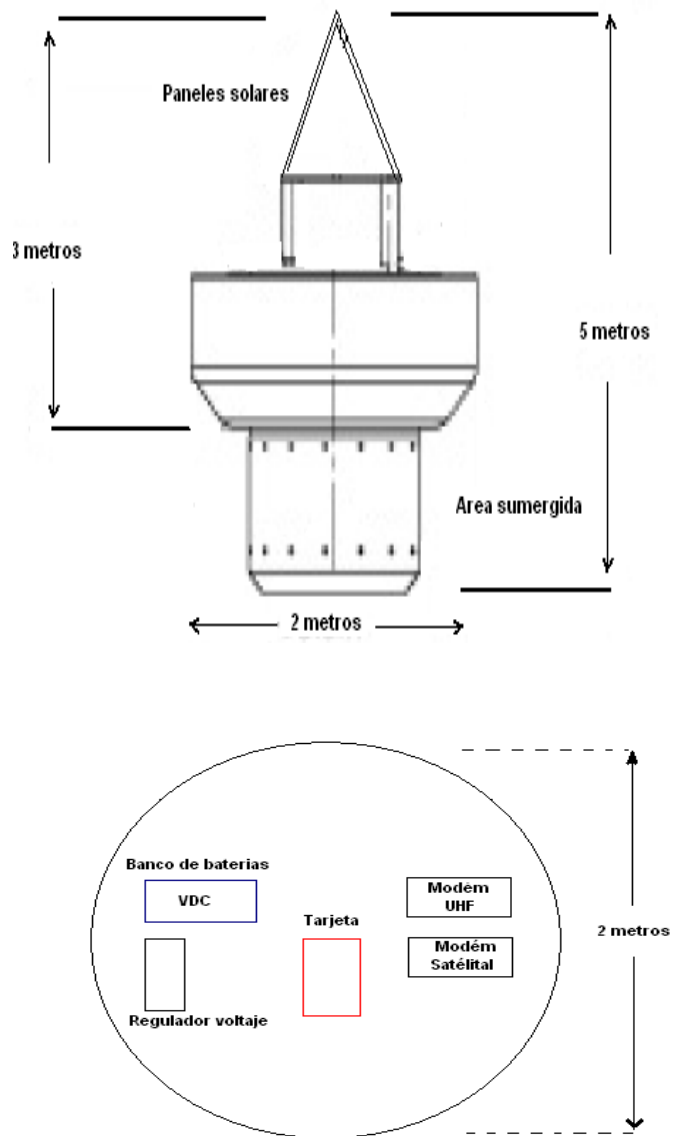
3.7.1 Dimensiones de la boya de acuerdo a los equipos del sistema. Como se mencionó en apartados anteriores el suministro de potencia requerido para los equipos instalados en la boya consiste de un sistema de alimentación fotovoltaico comprendido por paneles solares, baterías y regulador de voltaje, los cuales representan en gran medida el mayor requerimiento de espacio de la boya.

Por otro lado debido al consumo 349,0272 vatios por hora requerido para el sistema telemétrico el tamaño de las baterías incrementa al igual que el tamaño de los paneles solares. En la tabla 27, se encuentran consignados las dimensiones de cada uno de los elementos y equipos que serán instalados en la boya.

Tabla 27. Dimensiones de los elementos y equipos que serán instalados en la boya.

Equipo	Alto (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)
Paneles solares	5	30	30
Baterías	10	10	20
Regulador	5	18	10
Tarjeta de desarrollo	3	10	18
Módems satelital BGAN	0.5	27.5	34.5
Radio módem UHF	5	12	20

Figura 41. Dimensiones generales de la boya.



De acuerdo a las dimensiones de los equipos antes mencionados y más precisamente a la necesidad de estabilidad de la boya, se determinó que el diámetro de la boya debe ser de 2 metros y debido a las condiciones de línea de vista requeridas previamente en el sistema de comunicación para la transmisión de datos vía UHF, la altura de la boya medida a partir de la superficie del océano hasta la parte superior de la misma es de mínimo tres metros con una longitud sumergida de dos metros, dejando de esta forma un longitud de un metro con 2 metros para la instalación de los equipos de telemetría.

3.7.2 Material de construcción de la boya de acuerdo a las condiciones ambientales de instalación. Teniendo en cuenta que la boya será instalada en el océano, donde el entorno marítimo representa condiciones muy adversas debida al alto grado de salinidad al cual se verán enfrentados los equipos de telemetría y la estructura de la boya como tal, se deben emplear materiales que garanticen la impermeabilidad del agua de mar.

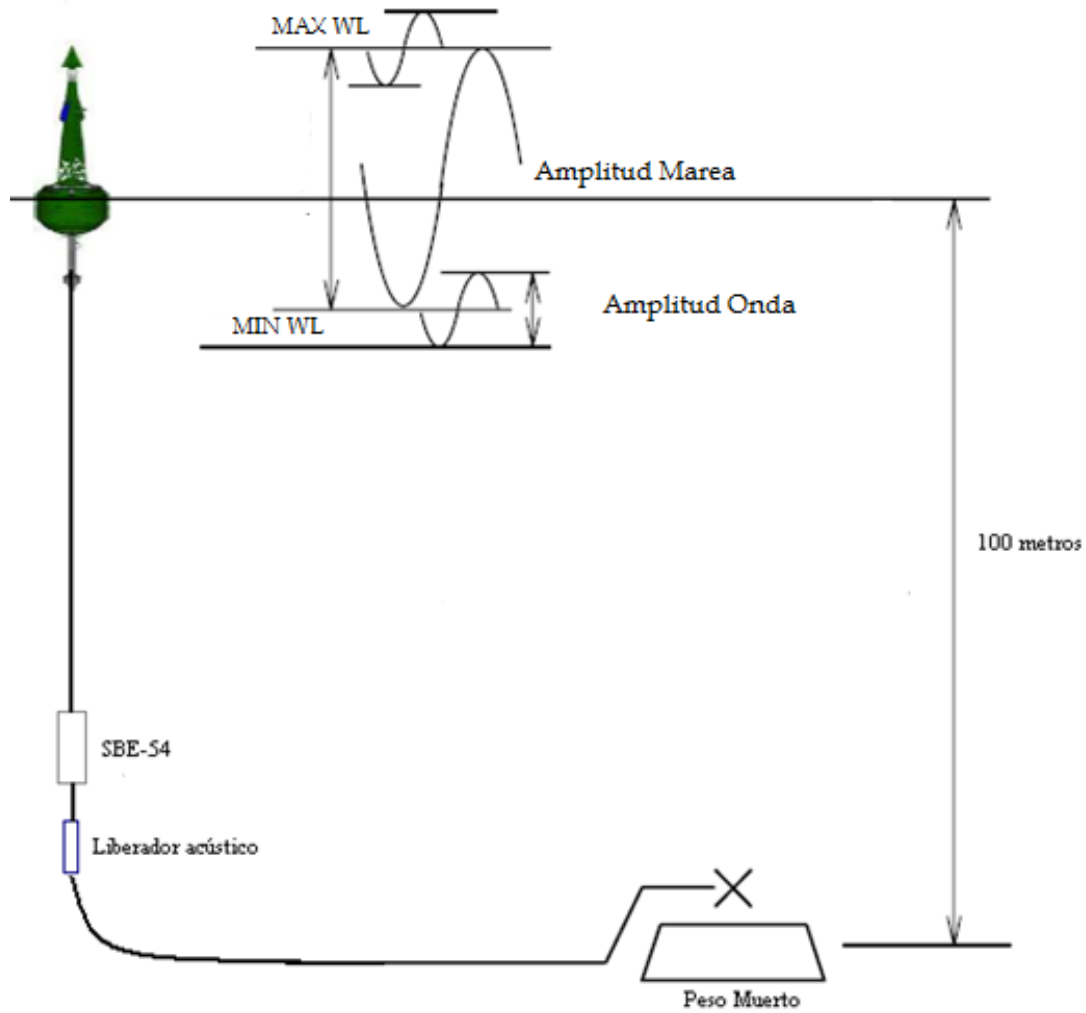
La fibra de vidrio es sin lugar a dudas el material de construcción actualmente más empleado por los ingenieros navales para la construcción de naves y boyas de diferentes tipos, remplazando de esta forma la lamina de acero. Esto se debe a su alto grado de impermeabilidad y costo relativamente mesurado. Es por esta razón que la boya será construida en casi un 90% de este material. (ver figura 42)

Figura 42. Aplicación de fibra de vidrio a una estructura de boya.



3.7.3 Flotabilidad y soporte de la boya. Para proporcionar flotabilidad a la boya se empleará como material el poliuretano el cual es aplicado al interior de la estructura de la boya para proveer un aceptable nivel de Buoyancia. De acuerdo a la profundidad de fondeo de 100 metros a la cual serán inmersos los sensores de presión se debe contar con cadenas con dimensiones que garanticen el grado de flotabilidad adecuado de acuerdo a las condiciones propias de la dinámica oceánica. Para determinar la longitud de la cadena se debe tener en cuenta la altura máxima de la ola que puede presentarse en presencia de una variación extrema crítica en el nivel del mar. La figura 43, muestra un esquema de la distribución del sistema de fondeado, donde se puede observar la relación existente entre las variaciones nivel del mar y el sistema de amarre de la boya.

Figura 43. Diagrama pictórico de la distribución del sistema de sensado.



De acuerdo a la longitud del cable estudiado de acuerdo a la velocidad de transmisión de datos del sensor SBE-54 y a la fuente de alimentación se tiene que la máxima longitud de cable que se puede emplear en la transmisión de datos desde el sensor a la tarjeta de desarrollo instalada en la superficie es de 126 metros.

3.8 DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE DETECCIÓN DE VARIACIONES EXTREMAS EN EL NIVEL DEL MAR DE TIPO TSUNAMIGENICO.

Para poder determinar las características del umbral de detección variaciones extremas, como las que caracterizan a los tsunamis, es necesario tener un completo conocimiento de la serie temporal obtenida para tal fin, por esta razón se debe realizar un análisis detallado de la señal aplicando estudios en el dominio de la frecuencia, análisis armónico y estadístico. Además de una amplia investigación sobre los patrones físicos que identifican al fenómeno en estudio con relación a las características morfológicas y dinámicas de la zona de aplicación que es en este caso la costa pacífica colombiana.

3.8.1 Estudio del registro instrumental. Como primera medida para la determinación parcial del umbral de detección de tsunamis de origen cercano se realizó el fondeo del sensor SBE-37 con la finalidad de obtener los registros instrumentales de los datos de presión (serie temporal).

El fondeo del sensor se realizó por un periodo de 29 días, el cual es el tiempo mínimo requerido para obtener los componentes armónicos principales presentes en un tipo de marea semidiurno que corresponde a esta zona. El sensor se programó con un intervalo de muestreo de 15 segundos, adquiriendo un total de 167040 datos registrados.

La profundidad es derivada a través de la medida de la presión hidrostática, p , esto es posible debido a las relaciones lineales existentes entre la profundidad geométrica, z y la presión hidrostática, $p=p(z)$. La relación es tal que la presión expresada en decibares es cercanamente la misma que la profundidad expresada en metros. La siguiente tabla muestra la validez de esta aproximación en la cual se emplea el algoritmo de la UNESCO. El porcentaje de diferencia es igual a la resta entre la presión y la profundidad, dividida entre el valor de la presión y multiplicada por 100%. Como se puede observar en la tabla 30 para valores de presión menores a 4000 decibar el porcentaje de diferencia se encuentra dentro de 2%. Este resultado obedece a la siguiente relación hidrostática.

$$p(z) = -g \int_0^z \rho(z) dz \quad (9)$$

Donde la integral se encuentra evaluada entre 0 y z , además $g=9.81m/s^2$
 $1025 kg/m^3$ densidad del agua, las unidades de $\rho=[kg/m^3]$ $[m/s^2]$, además $p=Fuerza/área=[N/m^2]=[Pa]=[10e-5 bar]$. Como un Newton $(N)=kgm/s^2$, se tiene que $p=1025*(9.81) z$, donde finalmente se llega a la siguiente aproximación $p=1.005525z$ (metros) en la cual p equivale a la presión hidrostática y z es la profundidad geométrica. (ver tabla 28)

Tabla 28. Relación de la presión hidrostática y la profundidad en un océano estándar.

Presión (dbar)	Profundidad (metros)	Diferencia (%)
0	0	0
100	99	1
200	198	1
300	297	1
500	495	1
1000	990	1
1500	1483	1.1
2000	1975	1.3
3000	2956	1.5
4000	3932	1.7
5000	4904	1.9
6000	5872	2.1

Una vez obtenido el archivo con los datos de presión registrados en dicho periodo de tiempo, estos son convertidos a valores de profundidad, obteniendo un porcentaje de error de 0.55%. Se muestra el registro de los valores de presión y su correspondiente valor de profundidad en un periodo de cinco minutos.

3.8.2 Detección de errores del registro. Cuando se realiza un registro instrumental de series temporales se debe verificar la no existencia de errores en la medida. Estos errores pueden presentarse a causa del mal funcionamiento del reloj interno del dispositivo o a causa de pérdida de muestras durante el registro de los datos lo que conlleva a errores en el intervalo de muestreo (t). Si N es el número de muestras colectadas, entonces $N(t)$ debe ser igual a la longitud total del registro, T . De esta forma teniendo en cuenta el intervalo de muestreo de 15 segundos ($t=15$ segundos) y el número de datos del registro ($N=167040$), se encontró un periodo de 2505600 segundos que equivalen correctamente al periodo de muestreo de 29 días.

También se hizo la comparación de los datos obtenidos en superficie antes de la inmersión del equipo registrados con el sensor en el proceso de prueba y programación del equipo, con datos capturados en la superficie después del muestreo de 29 días de esta forma se corroboró el buen funcionamiento de los coeficientes de calibración. (ver tabla 29)

Tabla 29. Datos de presión registrados por el sensor SBE-37 y su correspondiente equivalente de profundidad en un periodo de 5 minutos.

Tiempo	Presión (dbar)	Profundidad (m)
17:00:01	6.080	6.04656
17:00:16	6.080	6.04656
17:00:31	6.086	6.052527
17:00:46	6.086	6.052527
17:01:01	6.092	6.058494
17:01:16	6.092	6.058494
17:01:31	6.098	6.064461
17:01:46	6.098	6.064461
17:02:01	6.104	6.070428
17:02:16	6.104	6.070428
17:02:31	6.104	6.070428
17:02:46	6.110	6.076395
17:03:01	6.110	6.076395
17:03:16	6.116	6.082362
17:03:31	6.116	6.082362
17:03:46	6.122	6.088329
17:04:01	6.122	6.088329
17:04:16	6.128	6.094296
17:04:31	6.128	6.094296
17:04:46	6.134	6.100263
17:05:01	6.134	6.100263

3.8.3 Análisis del registro instrumental. El análisis del nivel del mar se puede realizar por medio de dos aproximaciones estas son, el análisis estadístico y el análisis espectral o en el dominio frecuencial, este último aunque es un poco más complejo que el primero es más adecuado ya que refleja con mayor aproximación las características reales del océano.

3.8.3.1 Análisis en el dominio de la probabilidad. En la figura 59 se observa el análisis del registro instrumental desarrollado con la herramienta wavelets de MATLAB, donde se han obtenido los parámetros correspondientes a la estadística de tipo descriptivo.

Se obtuvo un nivel medio de 5.195 metros, un valor máximo de marea de 6.841 metros y mínimo de 3.593 metros. La desviación estándar de los datos fue de 0.9021. En esta figura se puede observar el histograma del registro instrumental donde es posible observar la distribución de los datos representados con 30 barras.

Se encuentra la señal residual obtenida a través del análisis wavelet la cual tiene una amplitud máxima de 0.067 m, un valor medio de 0.335 mm, desviación estándar de 0.0178 y el histograma correspondiente a dicha señal. (ver figuras 44 y 45)

Figura 44. Principales Parámetros de la estadística descriptiva del registro instrumental obtenida mediante el análisis Wavelets.

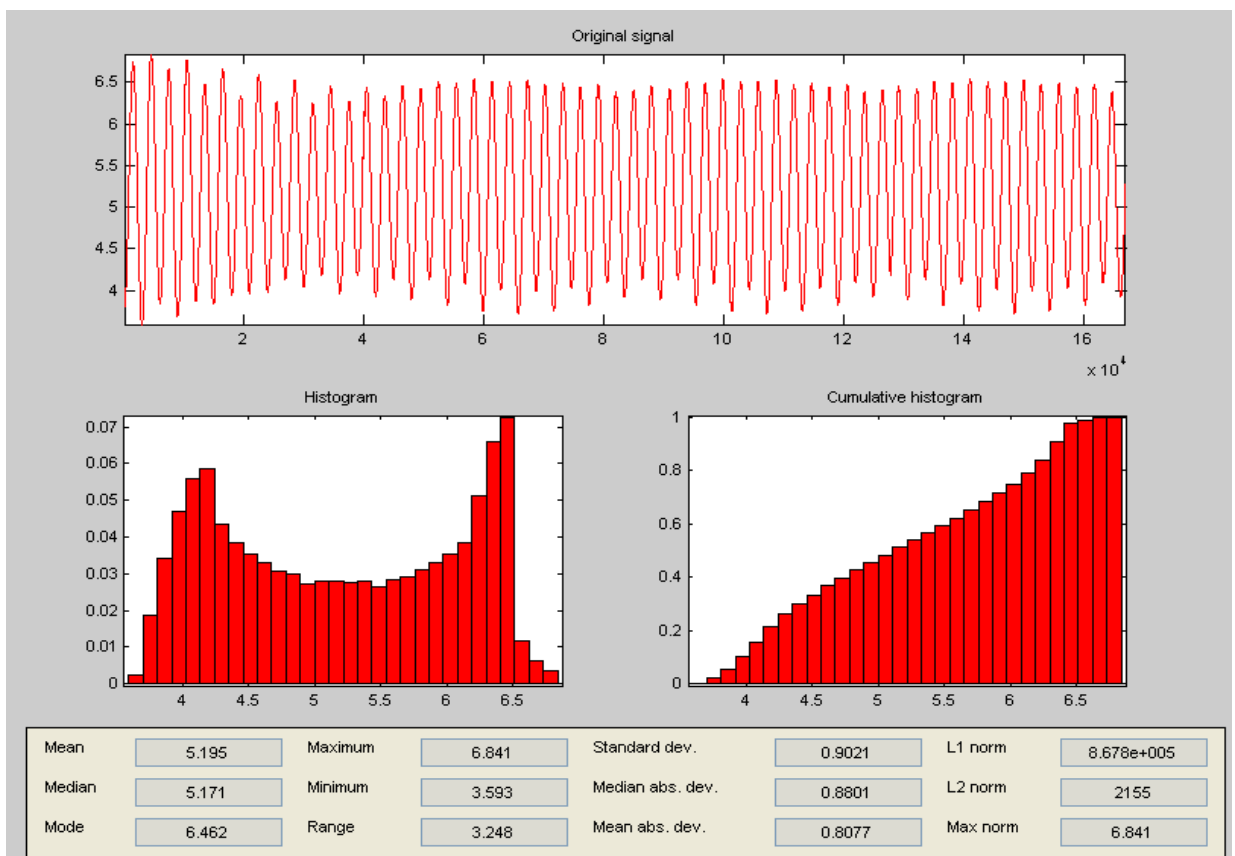
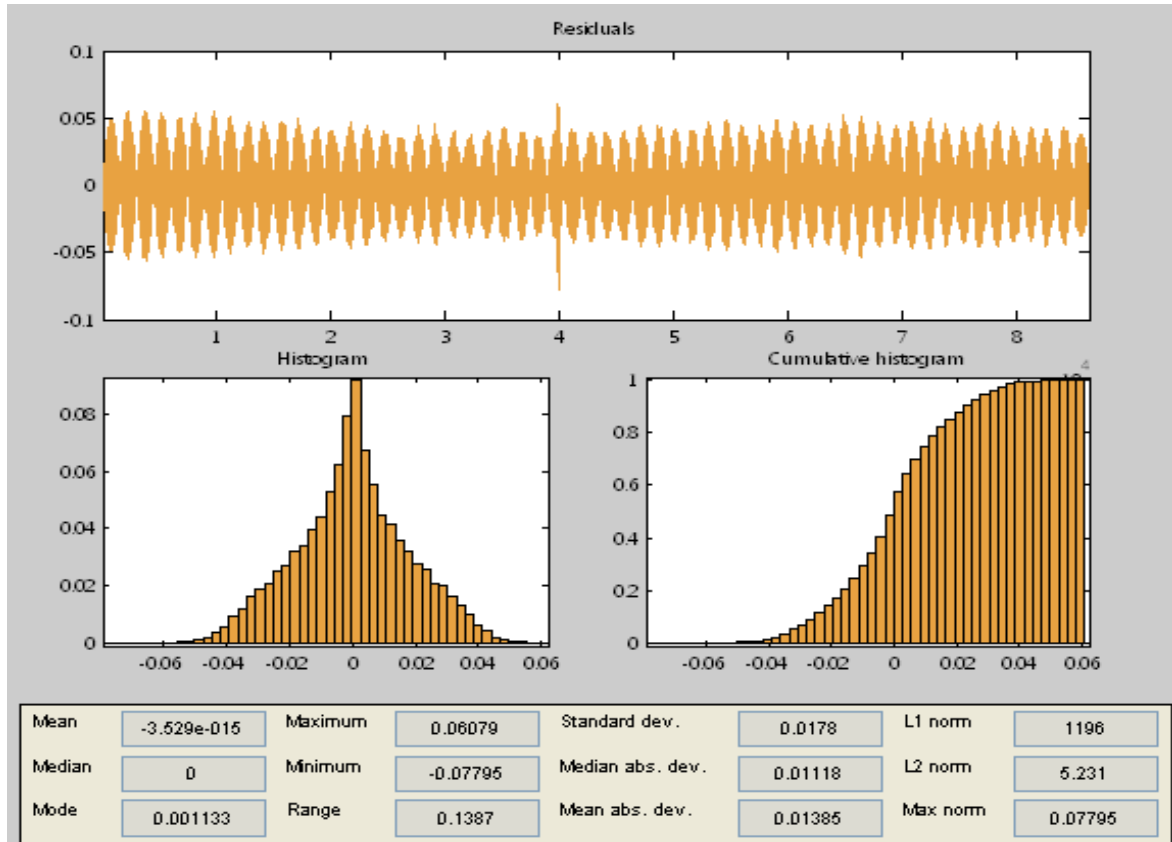


Figura 45. Principales Parámetros de la estadística descriptiva de la señal residual obtenida mediante el análisis Wavelets.



3.8.3.2 Análisis en el dominio de la frecuencia. A través del análisis en el dominio de la frecuencia se ha encontrado la función de densidad espectral, empleando el método de descomposición del registro temporal en sus componentes de Fourier a través de la técnica de la transformada rápida de Fourier FFT.

De acuerdo al intervalo de muestreo y el periodo del registro instrumental, se encontró que la resolución en frecuencia equivalente a la frecuencia fundamental que es posible encontrar en el análisis es de $F_0=1/(N \cdot t)=5,98e-6$ ciclos por segundo y el valor máximo correspondiente a la frecuencia de Nyquist es $F_N=(1/(2 \cdot t)=0,033$ ciclos por segundo.

Antes de realizar el análisis espectral del registro instrumental se debe remover el valor medio del mismo de la serie temporal, ya que si este no es extraído antes de realizar este análisis se puede presentar una distorsión en el espectro

correspondiente a los componentes de baja frecuencia. En la figura 61 se obtuvo el espectro de frecuencia de datos de nivel de marea completo.

Por otro lado las figuras 46 y 47, representan respectivamente el espectro en frecuencia del registro instrumental original por un periodo de 30 minutos (120 datos registrados) y análisis espectral con el mismo periodo de la señal residual en la cual se extrajo previamente las componentes mareales.

Figura 46. FFT del registro instrumental completo, arriba el espectro original y abajo con la aplicación stem de MATLAB.

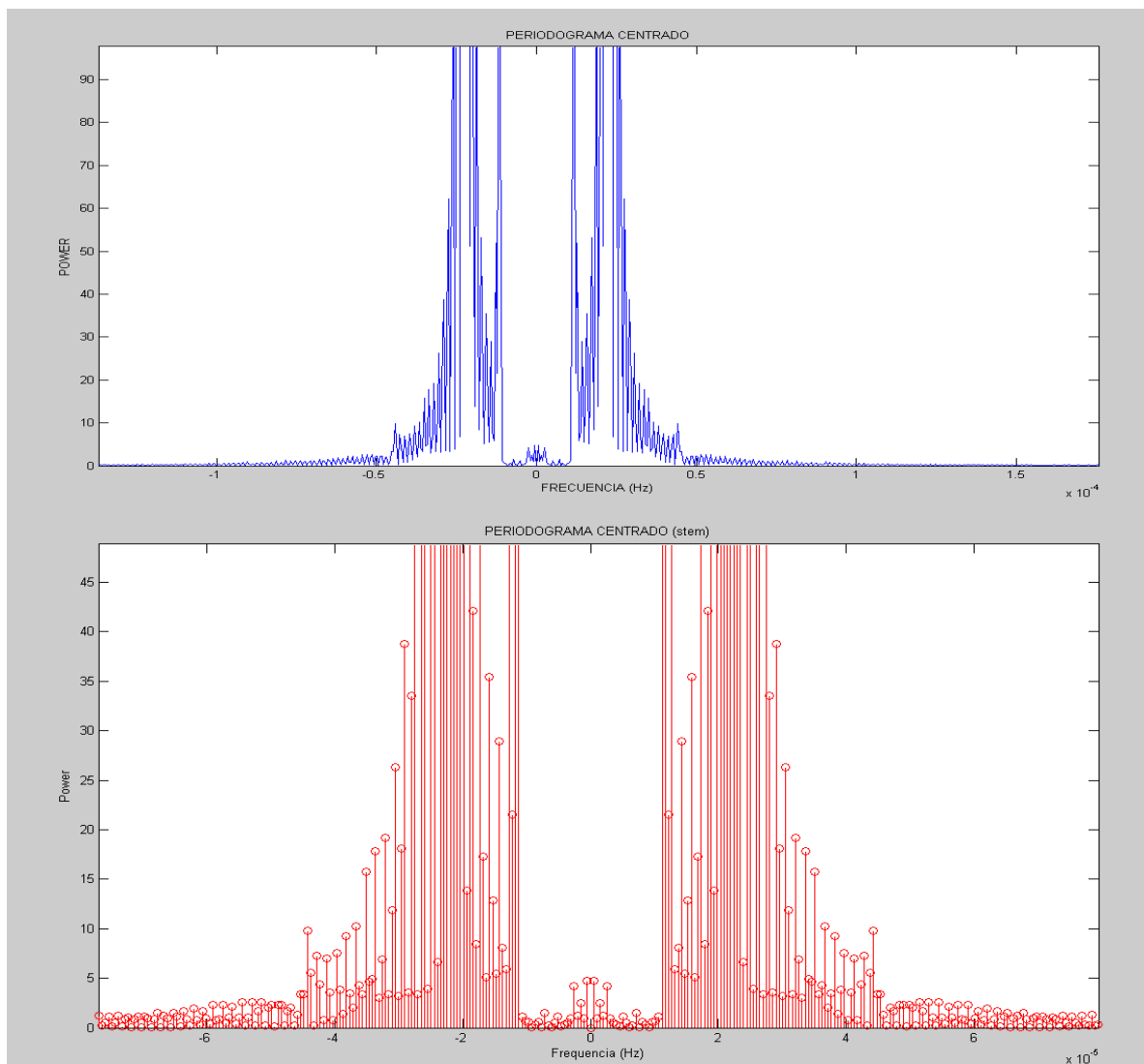


Figura 47. Densidad espectral de la señal residual en un periodo de 30 minutos correspondiente a 120 datos registrados.

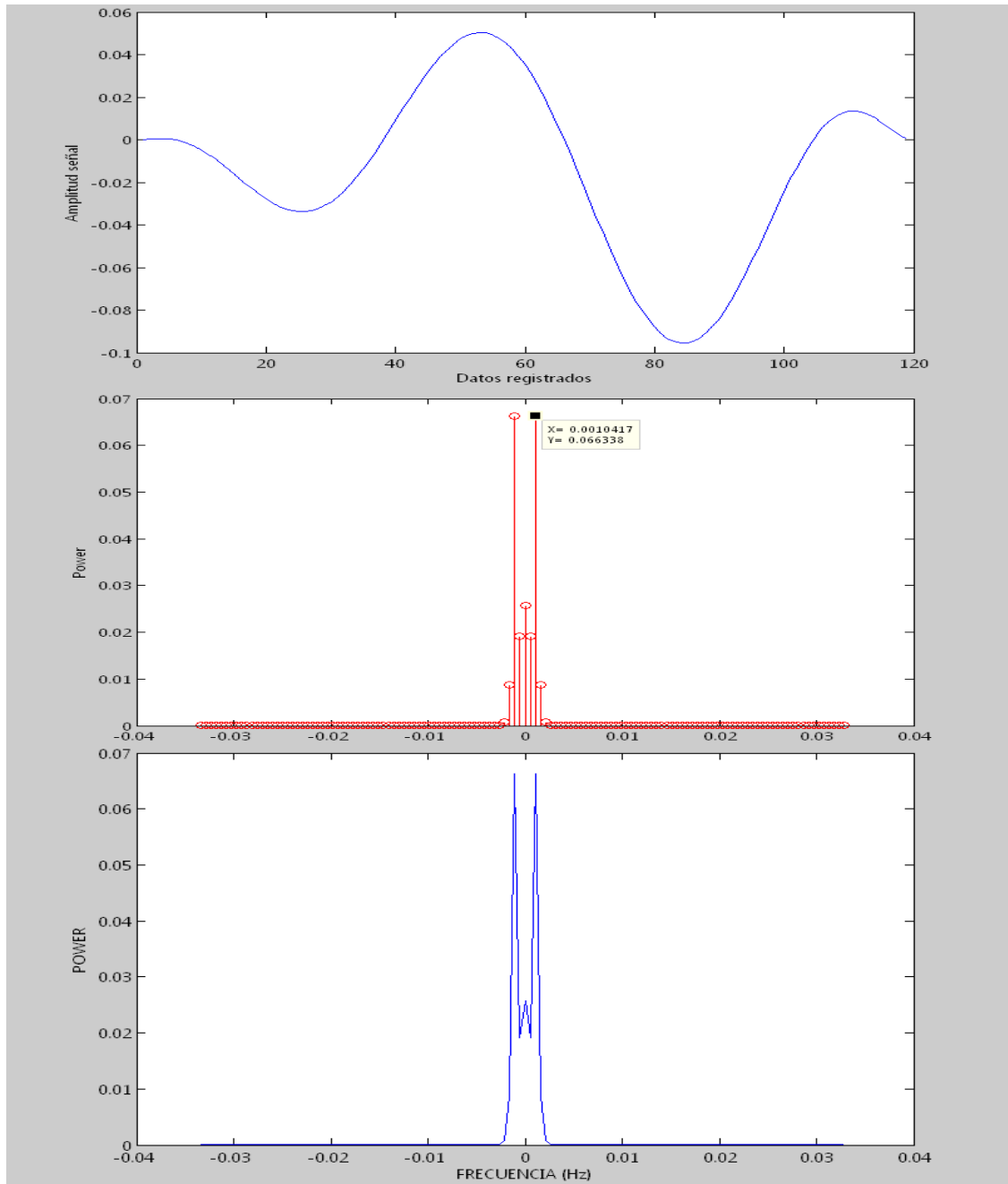
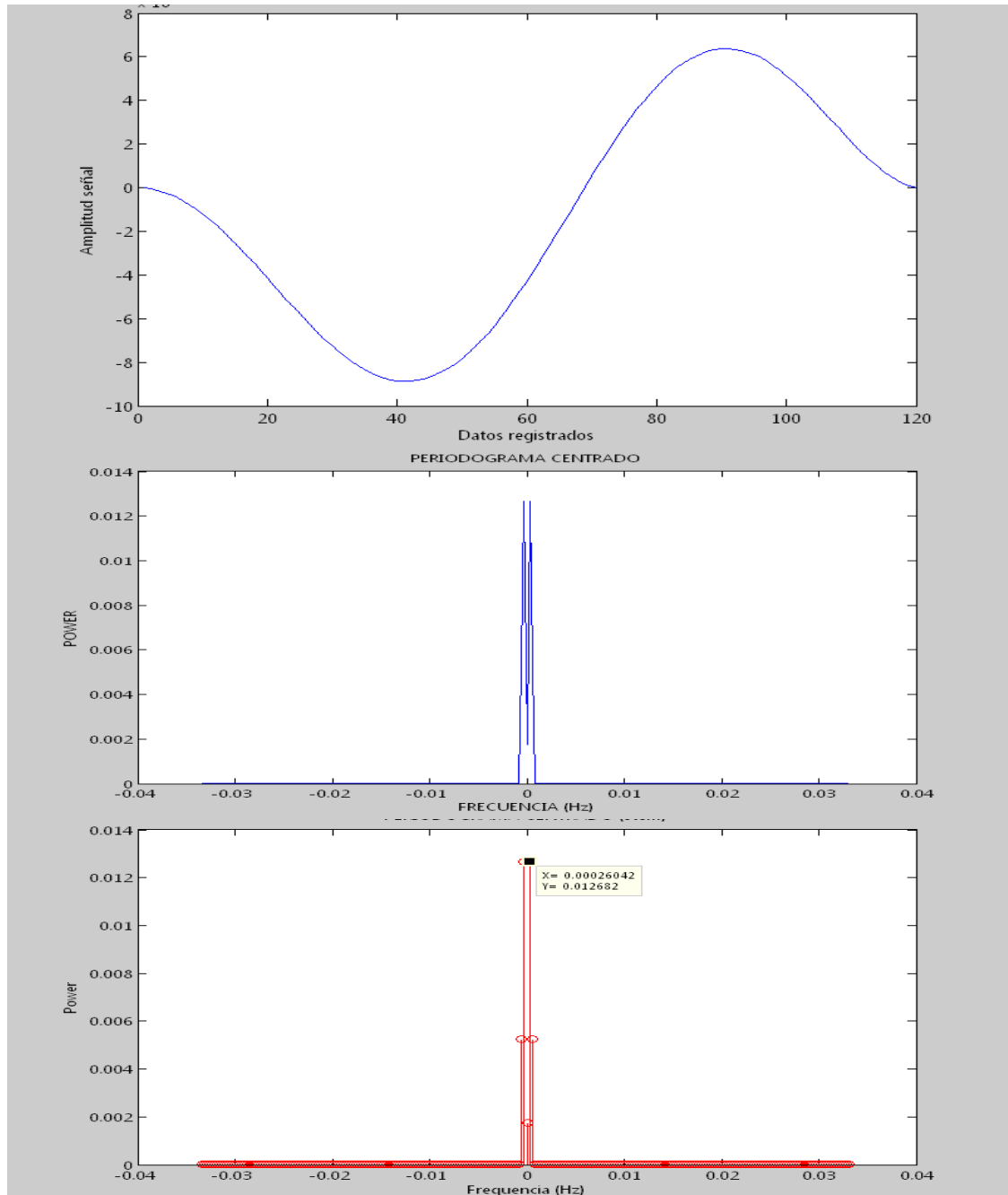


Figura 48. Componentes de frecuencia de la señal original tomando un periodo de 30 minutos representado en 120 datos registrados.



Teniendo en cuenta la simetría del espectro solo se toma para el análisis el eje de las abscisas en los valores positivos. Como se puede observar en la figura 48, se

observa que las amplitudes más altas correspondientes al espectro de frecuencias se encuentran establecidas en un rango de 0.00001 hz y 0.00003 hz.

3.8.3.3 Análisis armónico. El umbral de detección nos proporciona la base sobre la cual se va a soportar nuestro nivel de alerta por la posible presencia de eventos tsunamigénicos y es por esta razón que es la base fundamental del algoritmo computacional.

Una vez obtenido los registros instrumentales de 29 días, se realizó el análisis de los datos obtenidos a través del ejecutable ARM. Este ejecutable permite la obtención de las componentes armónicas del registro mareal, encuentra el residuo entre el registro mareal real y la marea predicha generada por el ARM. (ver figuras 49 y 50)

Los datos registrados por el SBE-37, tienen un periodo de muestreo de 29 días con un intervalo de muestreo de 15 segundos lo que equivale a un total de 167040 datos.

Figura 49. De izquierda derecha columnas correspondientes al consecutivo de datos, marea real, marea generada y residuo meteorológico.

Consecutivo de datos	Marea real	Marea generada	Residuo meteorológico
10	6.214276	6.154990	0.059286
11	6.215432	6.161960	0.053472
12	6.216584	6.161960	0.054624
13	6.217731	6.161960	0.055771
14	6.218874	6.161960	0.056914
15	6.220012	6.167920	0.052092
16	6.221145	6.167920	0.053225
17	6.222274	6.167920	0.054354
18	6.223399	6.167920	0.055479
19	6.224518	6.173890	0.050628
20	6.225633	6.173890	0.051743
21	6.226744	6.173890	0.052854
22	6.227850	6.173890	0.053960
23	6.228951	6.179860	0.049091
24	6.230048	6.179860	0.050188
25	6.231140	6.179860	0.051280
26	6.232228	6.179860	0.052368
27	6.233311	6.179860	0.053451
28	6.234389	6.185820	0.048569
29	6.235462	6.185820	0.049642
30	6.236531	6.185820	0.050711
31	6.237596	6.185820	0.051776

Figura 50. Componentes armónicas del registro mareal.

NUMERO DE PUNTOS = 167040					
COMP.	FRECUENCIA	A	B	AMPLITUD	FASE [S]
M2	28.984104	1.187197	0.218386	1.207116	10.423089
S2	30.000000	-0.164662	0.110442	0.198270	146.149421
K2	30.082137	-0.013386	0.033098	0.035702	112.020362
N2	28.439730	0.016835	0.202110	0.202810	85.238340
Q1	13.398661	0.013051	-0.006121	0.014415	-25.128768
O1	13.943036	-0.051090	0.025301	0.057012	153.654150
M1	14.496694	0.123931	0.002378	0.123954	1.099254
P1	14.958931	-0.536570	-0.081625	0.542743	-171.350262
K1	15.041069	0.349613	0.167734	0.387768	25.630326
2SM2	31.015000	-0.001426	-0.009606	0.009711	-98.442328
Sa	0.041067	0.769440	-0.184160	0.791172	-13.460113
ERROR CUADRATICO MEDIO = 0.024195					
ERROR MEDIO = 0.019240					
ERROR MAXIMO = 0.075636					

Las amplitudes de las componentes armónicas obtenidas obedecen fielmente al tipo de marea semidiurna que rige en el municipio de Tumaco. Estas componentes son Lunar principal (M2), Solar principal (S2), y Elíptico lunar mayor (N2). (ver figura 51)

Figura 51. En color azul el nivel de marea registrada, en color verde marea generada por el ARM y color rojo residuo.

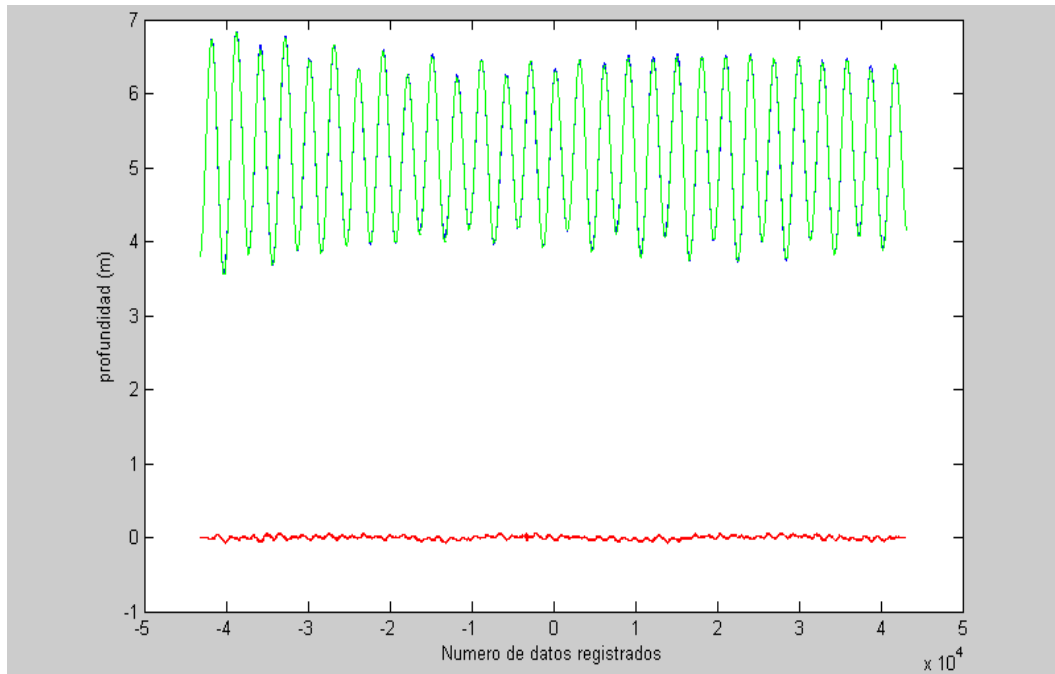
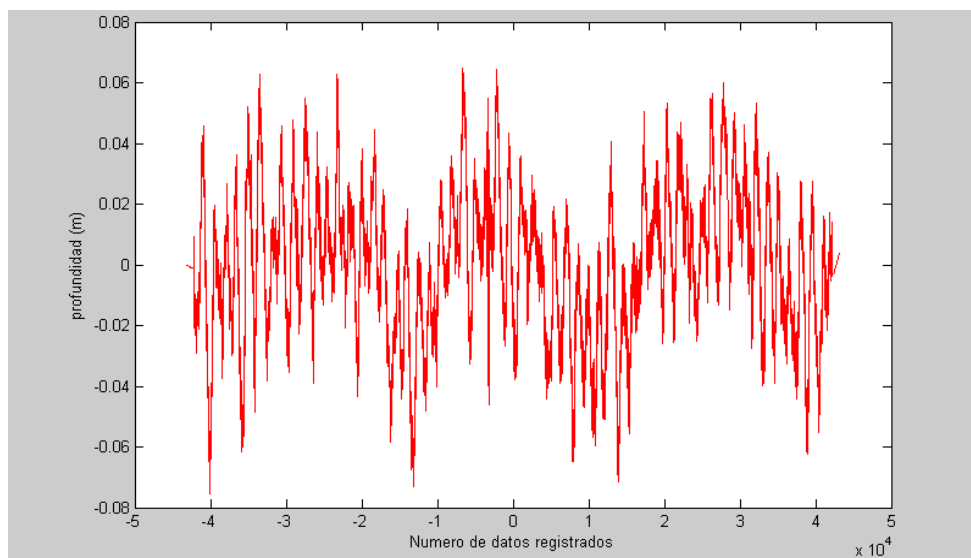
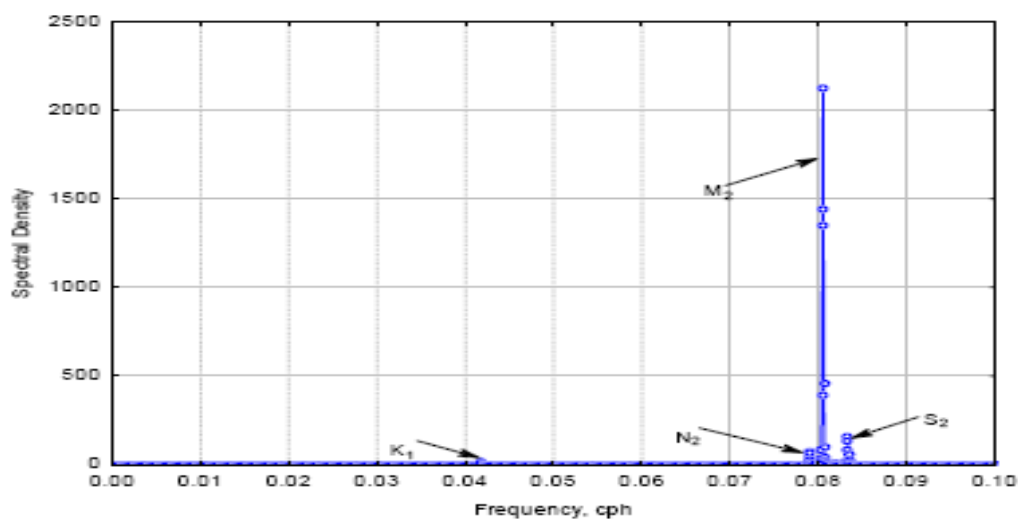


Figura 52. Residuo correspondiente al registro instrumental.



Por otro lado comparando los resultados obtenidos por el IDEAM en el estudio sobre la determinación de las componentes armónicas de la marea y descripción de su comportamiento en diferentes puntos de las costas colombianas, se encontró que para Tumaco se analizó un registro mareal de un año (1969-1970) muestra que el mayor aporte en la formación de la marea lo da la componente M_2 , después sigue la componente S_2 , la componente N_2 y la onda K_2 . (ver figura 53)

Figura 53. Densidad espectral de las componentes armónicas presentes en Tumaco encontradas por el IDEAM.



Teniendo seguridad de las componentes armónicas encontradas se define que el residuo obtenido tiene una amplitud de 0.069 metros y obedece a la marea meteorológica, es decir, a los efectos de la fricción del piso oceánico, a términos no lineales en las ecuaciones del movimiento y a algunos efectos atmosféricos.

Con fines de validación del umbral de ruido obtenido se realizó el análisis de un segundo registro instrumental como resultado del fondeo del sensor de presión SBE-37 en el mismo punto por 29 días, encontrando valores muy similares en las amplitudes de las componentes armónicas, y en la amplitud del residuo con lo cual se cumple con los conceptos de repetitividad y fidelidad importantes en la medición de parámetros, como es en este caso la presión. Vale la pena resaltar que el valor umbral encontrado corresponde al identificado previamente con la herramienta wavelet de MATLAB.

Para lograr identificar una ola de tipo tsunami evitando generar falsas alarmas en la población se debe realizar un sensado de los cambios de presión en una escala milimétrica presentados en la columna de agua. El intervalo de muestreo de los datos debe ser lo suficientemente rápido para permitir caracterizar la forma de la onda tsunami en tiempo real.

3.9 UMBRAL DE DETECCIÓN DE VARIACIONES EXTREMAS EN EL NIVEL DEL MAR DE TIPO TSUNAMIGÉNICO

Una vez analizadas algunas de las principales características que describen el comportamiento del nivel del mar en Tumaco a través del registro instrumental y la determinación de los parámetros más relevantes de las ondas de tipo tsunami relacionadas con las condiciones morfológicas de la costa pacífica colombiana, el siguiente paso es la determinación del umbral de detección de tsunamis de origen cercano para el sistema electrónico de alerta temprana.

Los parámetros tenidos en cuenta en el desarrollo del algoritmo computacional que permitirá discernir la posible presencia de un evento de tipo tsunamigénico en la bahía de Tumaco son los cambios de presión en la columna de agua debido al abrupto descenso del nivel del mar, la detección de las componentes espectrales dentro de la banda de frecuencia de tsunamis en el punto de instalación del sistema de sensado en y la monitorización de la amplitud del umbral de ruido de piso oceánico.

3.9.1 Cambios de presión en la columna de agua debido al abrupto descenso del nivel del mar. De acuerdo a las tres modelaciones numéricas realizadas con el MOST empleando parámetros sísmicos reales con base a registros históricos en el punto de instalación del sistema remoto (posición de la boya C), se observa un abrupto descenso del nivel del mar con características lineales hasta llegar a su mínima amplitud en un periodo promedio de 6.4 minutos.

El primer valor detectado después del evento tsunamigénico correspondiente al abrupto descenso en el nivel del mar y su nivel mínimo alcanzado se indica en la tabla 30.

Tabla 30. Descenso del nivel del mar de acuerdo a las modelaciones numéricas.

Evento	Magnitud	Fallas activas	Primer valor detectado	Valor mínimo Marea
1	8.2 Mw	2	-9,025 cm	-69.60 cm
2	8.2 Mw	4	-5,57 cm	-34.70 cm
3	8.8 Mw	4	-44,25 cm	-278.43 cm

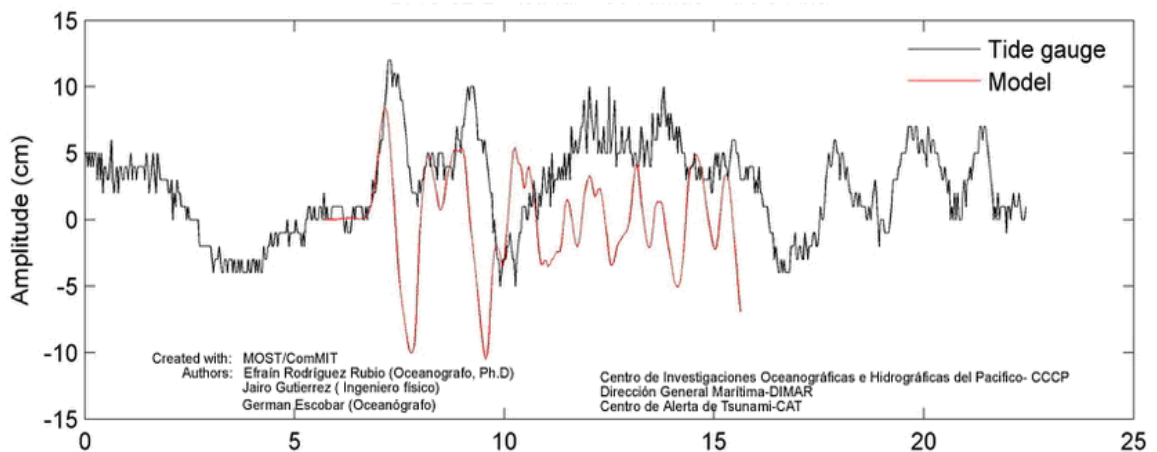
En los tres eventos señalados, el descenso del nivel de marea se presenta con un periodo aproximado de 6.4 minutos hasta llegar a su valor mínimo más próximo y un rango de amplitud comprendido entre los -5.57 y -278.43 centímetros, el cual es un tiempo y una amplitud que puede ser incluida en el algoritmo computacional para la identificación de un posible evento tsunamigénico.

3.9.2 Umbral de ruido del fondo oceánico. De acuerdo al análisis del registro instrumental desarrollado hasta el momento con la herramienta wavelet y el análisis armónico realizado con el ejecutable ARM, se encontró que el ruido del fondo oceánico para el municipio de Tumaco es de 0.675 metros de amplitud. Debido a que los registros instrumentales fueron obtenidos en el muelle de Guardacostas en la base naval del morro, es recomendable obtener registros instrumentales en el punto de instalación del sistema de sensado (boya C), ya que los datos con los que se cuenta actualmente pueden presentar posibles efectos de los procesos costeros.

3.9.3 Cambios significativos en los componentes espectrales presentes en el nivel del mar. Con el fin de conocer la banda de frecuencia de tsunami y encontrar la diferencia entre las componentes espectrales observadas en el registro instrumental original y las características espectrales observadas en las tres modelaciones numéricas de tsunamis de origen cercano realizados con el MOST se desarrollo el análisis en el dominio de la frecuencia de estas señales. Cabe destacar que las modelaciones numéricas realizadas por el MOST presentan un alto grado de aproximación a las características presentadas en

eventos de tipo tsunamigénico real. Ejemplo de ello es la modelación numérica publicada por la NOAA realizada por investigadores de la DIMAR- CCCP con base a los parámetros sísmicos del tsunami ocurrido en Chile el 27 de febrero del año 2007 la cual al ser comparada con la serie temporal obtenida a través de un mareógrafo ubicado en el muelle de guardacostas de la base naval de Tumaco manifiesta una alta correspondencia en el tiempo de llegada de la ola, amplitud y periodo de la señal. La figura 54, Muestra el resultado de esta comparación y la modelación numérica mas reciente realizada con el MOST del tsunami de Japón el día 11 de marzo (anexo 2).

Figura 54. Tsunami de Chile registrado por mareógrafos en la base naval de Tumaco y la modelación numérica correspondiente al evento realizada con el MOST.



A las tres señales obtenidas como resultado de las modelaciones numéricas desarrolladas con el MOST empleando fallas y magnitudes de sismo similares a las producidas históricamente en la región, y que han sido desencadenadores de tsunami (terremoto de 1979 con magnitud de 8.8 Mw y fallas activas entre la población de Manta el Ecuador y Buenaventura en Colombia) se les extrajo el valor medio para minimizar posibles errores en la identificación de las componentes frecuenciales presentes en cada uno de los mareogramas sintéticos y se les realizó un filtrado de las componentes mareales para detectar con mayor precisión las componentes de frecuencia que caracterizan a la señal de tsunami encontradas.

La figura 55, muestra los mareogramas sintéticos obtenidos con el MOST en donde se han filtrado las componentes mareales. En esta gráfica se puede visualizar la señal generada, el mareograma sintético real y la señal residual.. Esta señal residual nos permitirá observar más claramente la densidad espectral de la onda tsunami.

Figura 55. Análisis armónico del mareógrafo sintético desarrollado con el ejecutable ARM. Con color azul se representa la marea generada, con rojo el mareógrafo sintético original y con el color verde la señal residual.

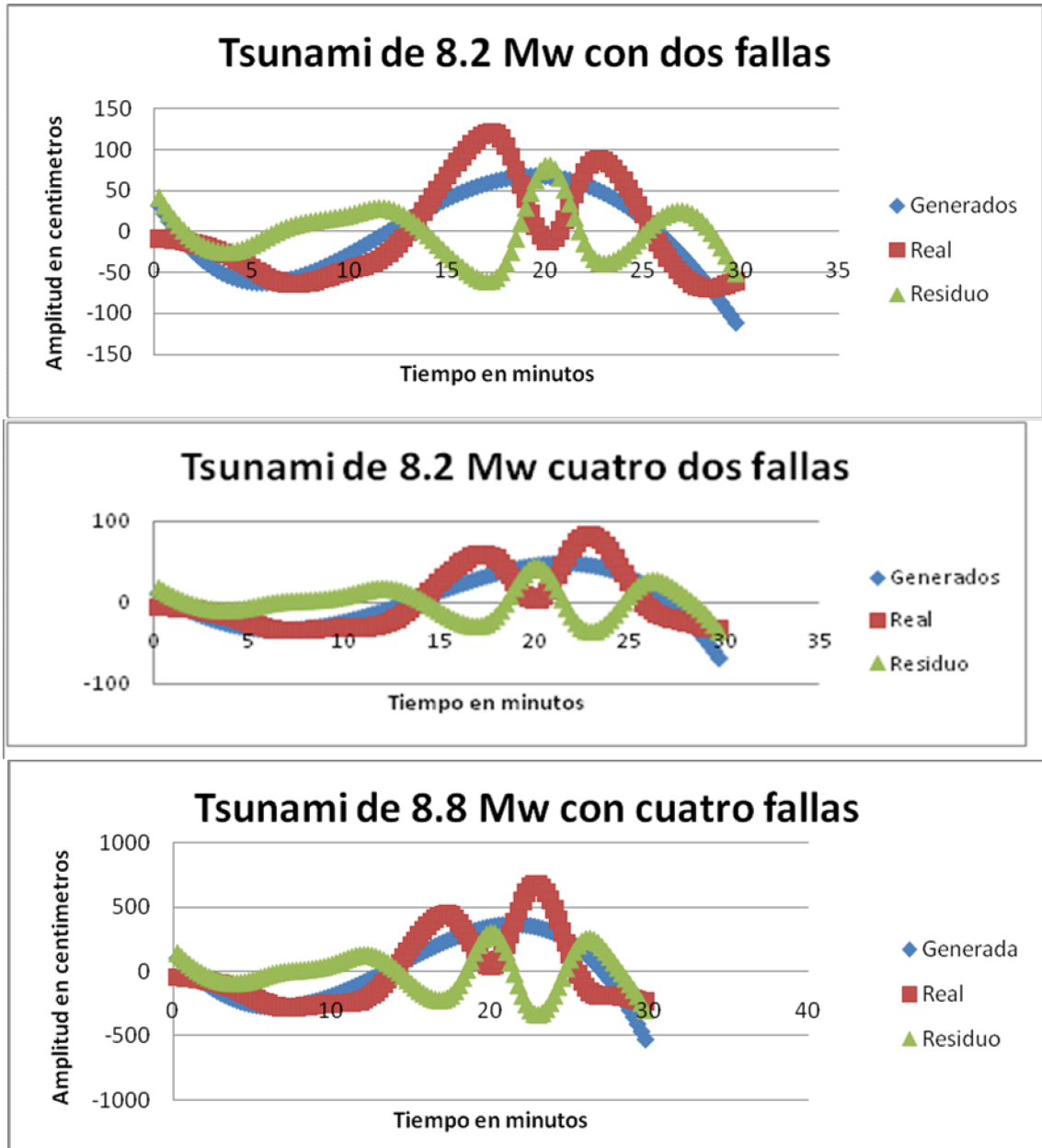
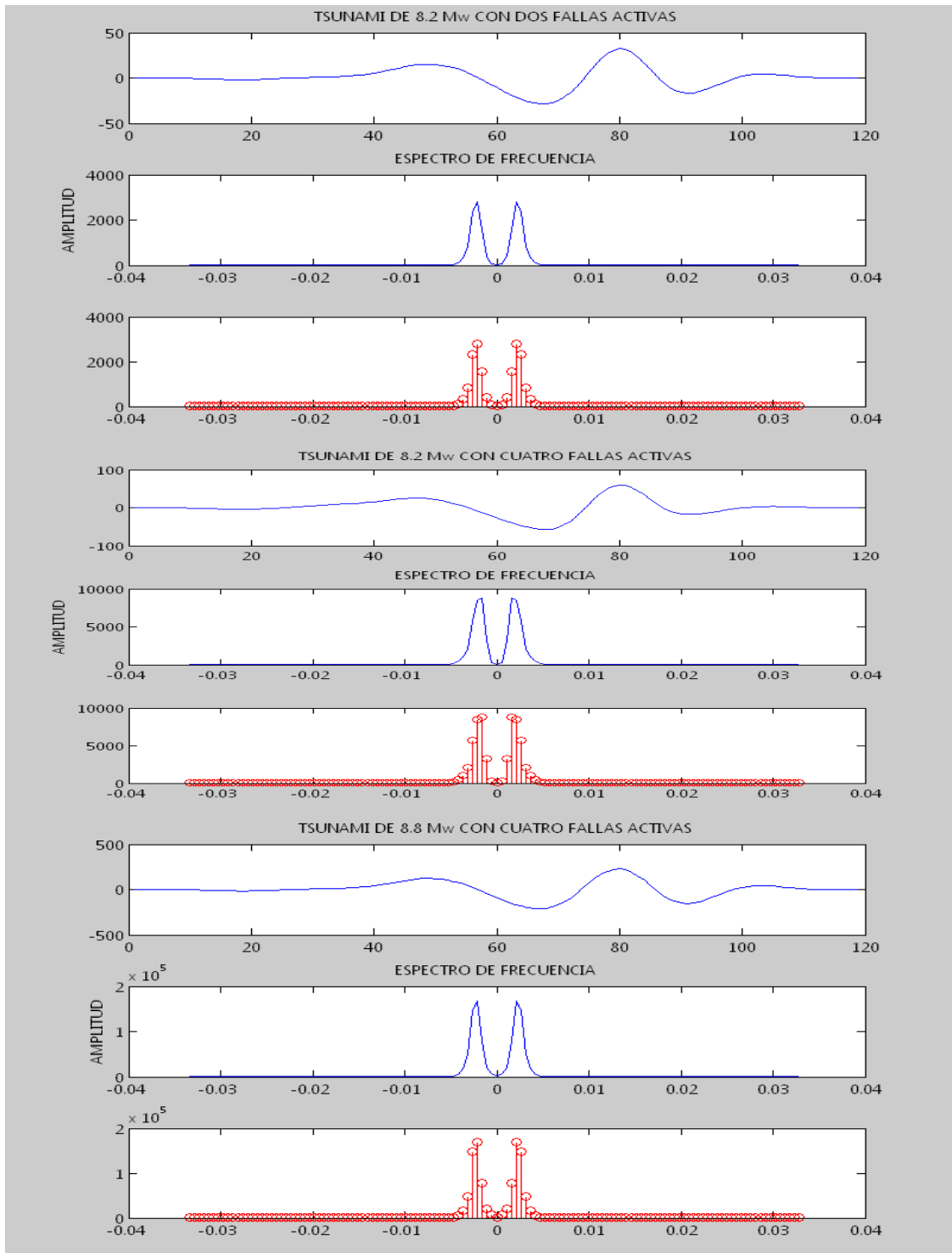


Figura 56. Respuesta en frecuencia de la señal residual obtenida después de filtrar las componentes mareales de los mareógramas sintéticos obtenidos en la posición de la boya C.



De acuerdo a los resultados obtenidos después de efectuar el análisis espectral de las señales sintéticas, se puede identificar los principales componentes frecuenciales presentes en los mareógramas sintéticos simulados en el punto de instalación del sistema de sensado (boya C), estos valores son 0.002604 Hz y 0.002083 Hz. Con esto se puede aproximar la banda de frecuencia para la bahía de Tumaco, la cual estaría comprendida entre estas frecuencias, que respectivamente corresponden a un periodo entre 6.4 minutos y 8.01 minutos, lo cual concuerda adecuadamente con el rango de periodo teórico de 5 a 60 minutos según la publicación realizada por la UNESCO en el año 2005. (ver tabla 31)

Tabla 31. Frecuencias obtenidas en las modelaciones numéricas realizadas con el MOST en la boya C.

Tsunamis	Frecuencia	Periodo	Amplitud
Evento 1	0.002604 Hz 0.002083Hz	6.4 minutos 8.01 minutos	21343.5 9706
Evento 2	0.002604 Hz 0.002083Hz	6.4 minutos 8.01 minutos	9390 4715
Evento 3	0.002604 Hz 0.002083Hz	6.4 minutos 8.01 minutos	9390 4715

3.10 TARJETA DE DESARROLLO

Debido a las condiciones en las cuales se encontrará instalado el sistema remoto de sensado, el cual consiste de dos sensores de presión SBE-54 y al proceso de adquisición necesario para el debido funcionamiento del sistema, se hace necesario emplear una tarjeta de desarrollo que puedan efectuar funciones de adquisición, procesamiento y almacenamiento de los datos capturados, permitiendo la multiplexación de los valores de presión entregados por dichos sensores. La tarjeta de desarrollo debe permitir el procesamiento y análisis de los datos en tiempo real por medio de un algoritmo computacional almacenado en su memoria interna, en donde las señales provenientes de los sensores de presión puedan ser comparadas para su debido control de calidad, además de la

monitorización del estado completo del sistema remoto, como son la detección de posibles fallas debidas a un deficiente suministro de potencia.

3.10.1 Requerimientos de la tarjeta para el sistema de detección de tsunamis.

El sistema debe disponer de dos puertos seriales RS-232 para la recepción de los datos provenientes de los sensores de presión SBE-54 los cuales se encuentran cumpliendo funciones de redundancia.

Para la comunicación de los datos vía inalámbrica, la tarjeta debe proveer una entrada que permita la transmisión y recepción de los datos por medio del radio módem UHF MHX 910 A, el cual puede ser conectado a través de la interfaz serial RS-232. De la misma forma debe existir otra entrada que permita la transmisión en doble vía a través del sistema de comunicación satelital BGAN de Inmarsat por medio del puerto Ethernet.

Otro requerimiento importante dentro del diseño del sistema es la posibilidad de reconfiguración y reparación de posibles fallas presentadas en la estación remota desde la estación terrestre ubicada en el CAT. Con esto se busca reducir costos producidos por reparaciones desarrolladas de forma convencional representadas en gastos de desplazamientos.

El suministro de potencia necesario para el funcionamiento del sistema embebido, debe coincidir con la fuente de alimentación que permite el funcionamiento de los otros equipos que serán instalados al interior de la boya, el cual consiste de un sistema fotovoltaico que suministra una potencia de 349,5 vatios por hora.

Por otro lado, pensando en los futuros desarrollos y la adición de nuevas funciones del sistema, se debe contemplar la adquisición de una tarjeta de desarrollo con una entrada adicional RS-232 para la adaptación de otro sensor, una salida para conexión de un sistema de sirenas que pueda funcionar in situ, y otras posibles adaptaciones contempladas a funciones de seguridad del sistema. En la tabla 37. Se encuentran resumidas las especificaciones más relevantes de la tarjeta de desarrollo.

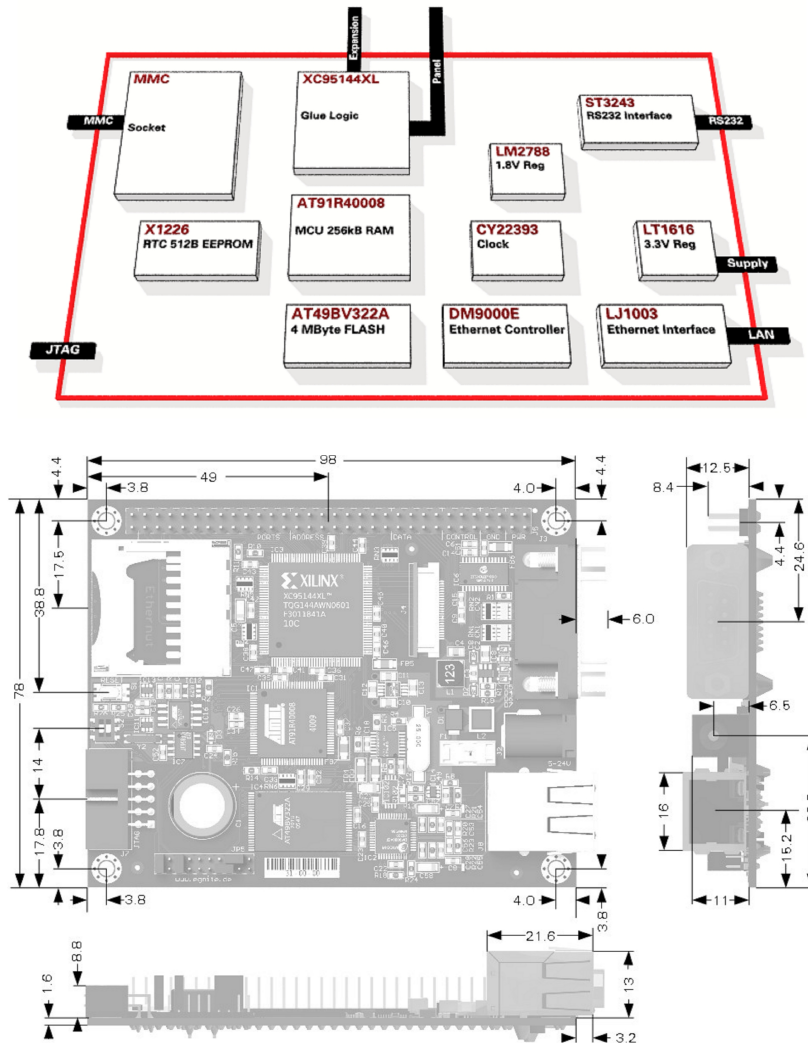
Después de realizar un proceso de investigación y análisis comparativo de las tecnologías existentes en cuanto a sistemas embebidos se seleccionó la tarjeta Ethernet 3.1 por presentar las características necesarias para el buen funcionamiento del sistema remoto. (ver figura 32)

Tabla 32. Características de la tarjeta Ethernet.

Característica	Descripción
Interfaz de comunicación	Full dúplex IEEE 802.3 Ethernet Serial RS-232
Memoria	4 Mbyte Flash ROM 256 Kbyte SRAM 512 Byte EEPROM
Reloj	Tiempo real con dos alarmas
Contadores	16 bits Watchdog timer
Entradas	24 líneas de entrada/salida programable RJ-245
Fuente de alimentación	5-24 VDC

Se debe aclarar que dentro del diseño del presente sistema, se tiene contemplado la adquisición y el envío de los datos de presión desde la estación remota a la estación terrestre ubicada en el CAT, donde por medio de una interfaz gráfica será posible la visualización de los datos del nivel del mar y el discernimiento de posibles eventos anómalos presentes en el mismo a la vez que se consideran las acciones pertinentes en cada caso. Sin embargo pensando en posibles mejoras al sistema se contemplo la necesidad de incorporar más puertos que permitan la conexión de otras funcionalidades. (ver figura 57)

Figura 57. Esquema general de la tarjeta Ethernetut 3.1



3.11 ALGORITMO DE DETECCIÓN DE TSUNAMIS DE ORIGEN CERCANO

El algoritmo de detección de tsunamis debe ser capaz de identificar posibles comportamientos anómalos en la dinámica oceánica de forma autónoma. Este proceso debe realizarse con base a tres parámetros de identificación, los cuales se encuentran representados por la amplitud del umbral mínimo, la banda de frecuencia de tsunami previamente encontrada y un descenso continuo del nivel del mar por un periodo aproximado de 7.25 minutos medidos desde el momento en que es detectado el primer dato del nivel del mar, hasta su valor mínimo pico de acuerdo a las modelaciones numéricas desarrolladas con el MOST en el punto de instalación del sistema de sensado (Boya C).

Dentro del algoritmo de detección de tsunamis de origen cercano se determinó como variables de entrada los datos provenientes de los dos sensores de presión enunciados en el en el capítulo 2, los cuales serán analizados en una primera etapa del algoritmo. Esta primera etapa identificará por medio de la comparación de las dos señales el grado de similitud entre ellas permitiendo discernir posibles anomalías en el funcionamiento de los sensores, como son bajo nivel de batería representado en un dato nulo procedente de uno de los sensores y datos erróneos. (ver figura 33)

Tabla 33. Descripción de las expresiones utilizadas en el algoritmo computacional.

Expresión	Función
D_PresionA	Dato proveniente del primer sensor de presión instalado.
D_PresionB	Dato proveniente del segundo sensor de presión instalado.
D_PresionT	Dato de sensor de presión evaluada con base a los sensores A y B.
MareaG	Marea generada con el ejecutable ARM.
ResiduoR	Residuo de la señal de marea obtenida como resultado de la sustracción de la marea registrada en tiempo real y la marea generada. (D_PresionT-MareaG).
ResiduoG	Residuo encontrado con el ejecutable ARM con base a registros instrumentales estudiados previamente.
FrecuenciaR	Frecuencia de tsunami calculada en tiempo real por el algoritmo computacional.
FrecuenciaG	Frecuencia de tsunami encontrada a través del estudio de señales de marea sintéticas obtenidas de la modelación numérica implementada con el MOST.
AmplitudR	Amplitud de la marea real registrada en tiempo real por los sensores de presión (amplitud de D_PresionT).
AmplitudD	Amplitud del descenso de la marea encontrada por medio de la modelación numérica desarrollada con el MOST.
tiempoR	Tiempo de descenso de la marea sensada en tiempo real.
tiempoD	Tiempo de descenso calculado por medio de las modelaciones numéricas desarrolladas por el MOST (420 segundos).

Niveles de alerta del sistema:

Nivel de alerta 1: En este nivel de alerta se deben tomar acciones de vigilancia debido a que se está presentando unas de las características que describen un evento tsunamigénico las cuales son un descenso en el nivel del mar en un periodo de tiempo preestablecido de 420 segundos de acuerdo a estudios realizados en el presente trabajo, un aumento del umbral de ruido oceánico preestablecido considerado análisis realizados por medio de registros instrumentales y por último, la banda de tsunami encontrada a través de modelaciones numéricas desarrolladas con el MOST en el punto de instalación del sistema remoto de alerta temprana.

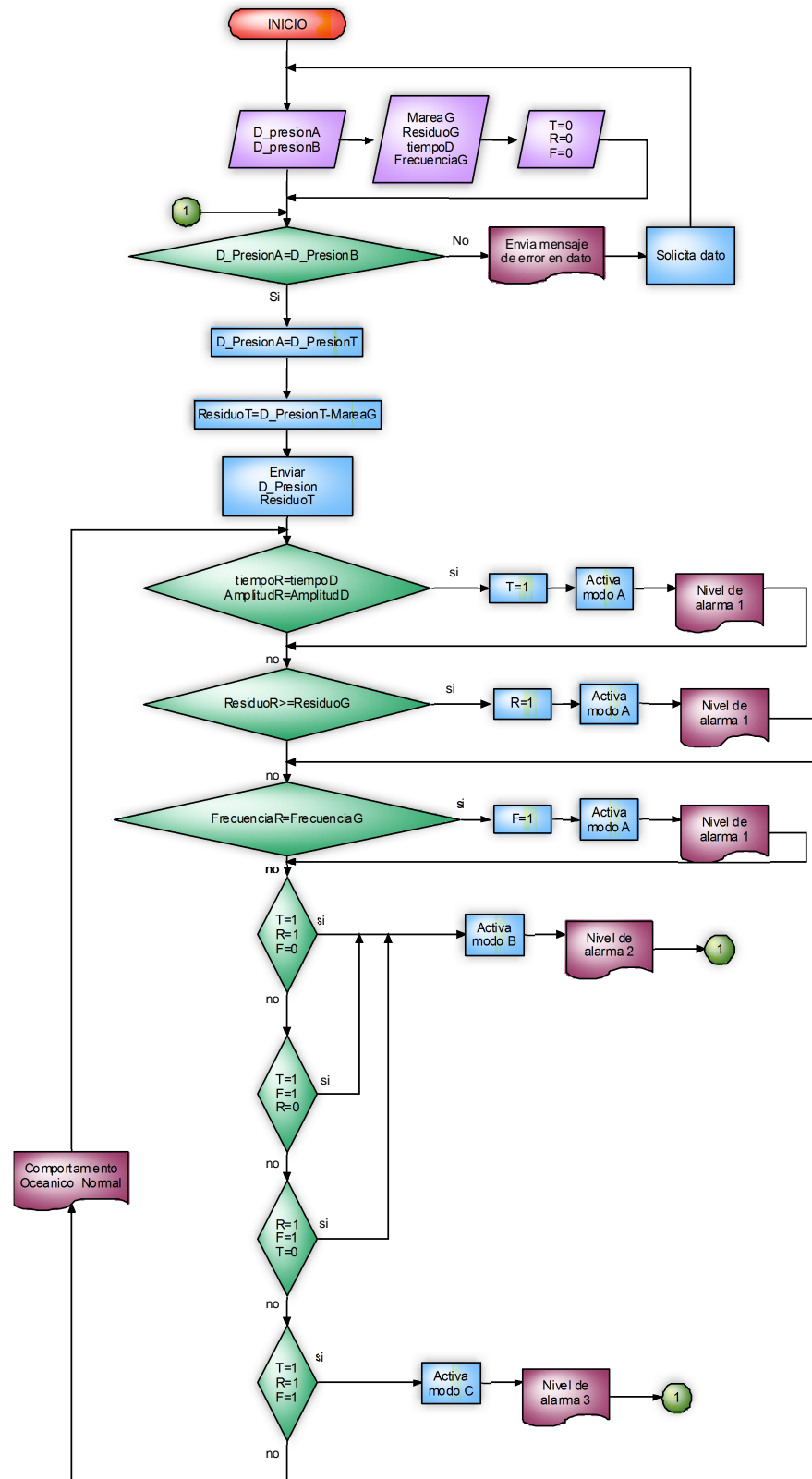
La vigilancia puede convertirse en una advertencia, aviso o ser cancelada, si la información disponible así lo amerita. Debe permanecer pendiente para más información y seguir las instrucciones de manejo de emergencia.

Nivel de alerta 2: este segundo nivel es considerado como una advertencia, se emite cuando hay un peligro potencial por un tsunami, ya que se detectan dos de las tres características principales que describen un evento tsunamigénico de acuerdo al presente trabajo. Independientemente de cuál de las características y el orden en el cual las mismas sean detectadas.

Nivel de alerta 3: Este es el nivel más alto de alerta de emergencia, se emite cuando hay un peligro inminente de inundación de la costa por tsunami. El aviso se puede extender por varias horas después de la llegada de la primera ola. Se recomienda desalojar la zona inundable, moverse a tierras altas y seguir las instrucciones de emergencia.

Operación normal del sistema: Como su nombre lo indica este aviso indica que el sistema no ha detectado ninguna anomalía en la dinámica oceánica, esto se refleja en la no detección de posibles características que describan un evento tsunamigénico. (ver figura 58)

Figura 58. Diagrama de flujo del sistema de detección de variaciones extremas en el nivel del mar.

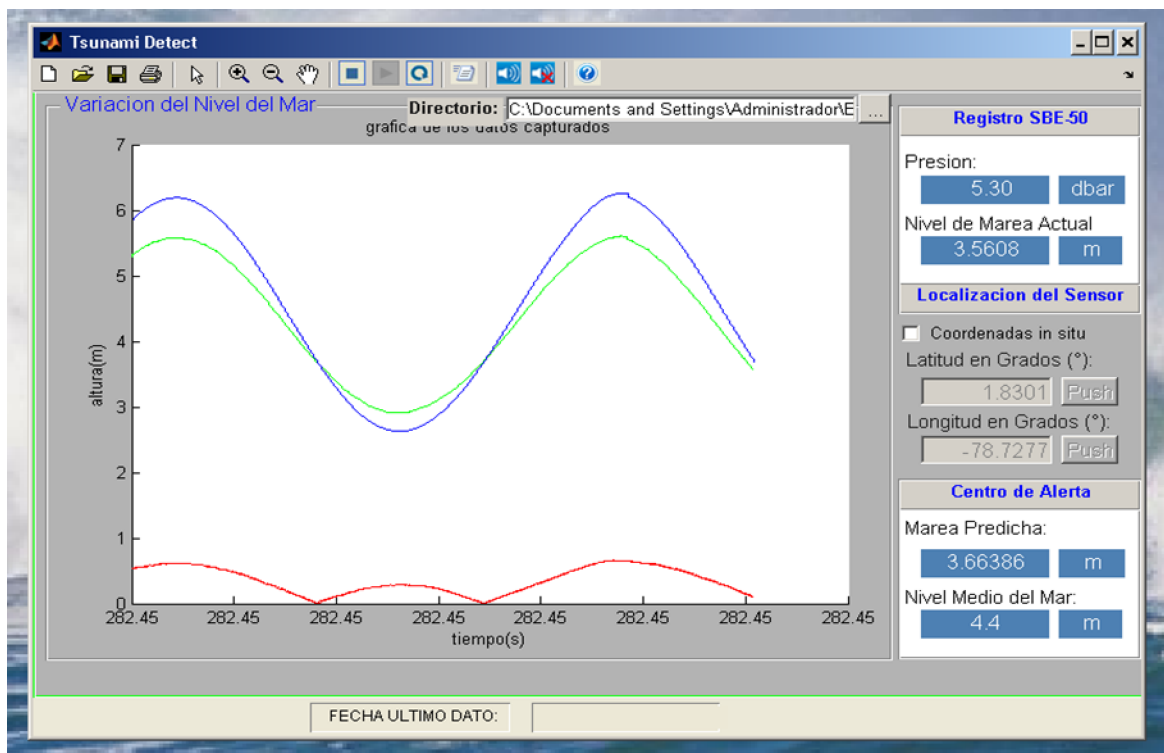


3.12 ADQUISICION Y VISUALIZACION DE DATOS EN MATLAB

Con la finalidad de disponer de una herramienta de tipo visual, interactiva y de fácil acceso para el personal encargado de la monitorización de posibles eventos anómalos en el nivel de marea que pueda desencadenar en posibles olas de tipo tsunami, se diseñó una interfaz gráfica de usuario en el lenguaje de alto nivel de MATLAB empleando la herramienta GUIDE.

Por medio de esta interfaz gráfica es posible visualizar en tiempo real el comportamiento mareal en el punto de instalación de los sensores de presión, a la vez que se observa la marea predicha de acuerdo a la integración de las principales componentes mareales que caracterizan la zona y la señal residual como resultado de las dos señales (marea real – marea predicha) la cual esta medida en metros. Si la diferencia supera un umbral se activa automáticamente una alarma sonora y las curvas inmediatamente cambian de color. La interfaz gráfica permite además observar la posición exacta de los equipos, proporcionando un mayor control de la posición de los mismos, lo cual es sumamente necesario debido a posibles desplazamientos de la boya producidos por la dinámica mareal. (ver figura 59)

Figura 59. Interfaz gráfica principal del software



4. PRESUPUESTO

DESCRIPCIÓN	Cantidad	Valor Total
Sistema de comunicaciones UHF	1	10000000
Sistema de comunicación satelital BGAN (Equipos terminales)	2	12000000
Tarjeta de desarrollo	1	3000000
Sensor SBE-54		6000000
Sensores SBE-50	2	37000000
Sistemas de alimentación fotovoltaico	2	3000000
Boya	1	35000000
Cadena y grilletes (200 metros)	1	35000000
Cable conductor (200 metros)	1	5000000
Sistema de liberadores acústicos	1	40000000
Estación de trabajo	1	8000000
Licencia MATLAB	1	40000000
Elementos de papelería		1000000
Otros materiales y suministros		1000000
Total		236000000

Los costos producidos en la implementación del presente proyecto serán asumidos por medio de recursos económicos generados por convenios entre la Dirección General Marítima – Centro de Investigaciones Oceanográficas e hidrográficas del Pacífico, DIMAR-CCCP y otras entidades del mismo orden.

5. CONCLUSIONES

El programa de MOST (Method of Splitting Tsunami), fue una de las herramientas más importantes dentro del desarrollo de la presente investigación, esto se debe al alto nivel de aproximación a eventos tsunamigénicos reales, ejemplo de ello es la modelación numérica del tsunami ocurrido en Chile el 27 de febrero del año 2010, el cual fue registrado por mareógrafos de la base naval de Tumaco. Esta modelación numérica fue desarrollada por investigadores del centro de investigaciones DIMAR-CCCP en Tumaco y se encuentra publicada en la página oficial de la NOAA.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis espectral de las señales sintéticas obtenidas de la modelación numérica de tsunamis con el MOST en el punto de instalación del sistema remoto (boya C), se puede aproximar una banda de frecuencia de tsunami para la bahía de Tumaco entre los valores de 0.002604 Hz y 0.002083 Hz, que respectivamente corresponden a un periodo entre 6.4 minutos y 8.01 minutos, lo cual concuerda adecuadamente con el rango de periodo teórico de 5 a 60 minutos según la publicación realizada por la UNESCO en el año 2005.

Acorde al análisis del registro instrumental desarrollado hasta el momento con la herramienta wavelet del lenguaje de alto nivel MATLAB y el análisis armónico realizado con el ejecutable ARM, se encontró que el ruido del fondo oceánico para el municipio de Tumaco es de 0.675 metros de amplitud, el cual es empleado en la determinación del umbral de ruido del sistema de alerta temprana.

El tiempo de descenso del nivel del mar observado en los tres eventos tsunamigénicos simulados con el MOST en el punto de instalación del sistema de sensado tienen un promedio de 6.4 minutos, siendo esta unas de las características

Principales que describen la posible presencia de un tsunami en la zona costera en estudio.

Con ayuda del software Radio Mobile fue posible determinar la viabilidad de la transmisión de los datos vía UHF a la estación remota ubicada a 25 kilómetros de la estación maestra ubicada en las instalaciones de la DIMAR en Tumaco. Para comprobar la veracidad de los resultados de la simulación realizada con esta herramienta, se desarrollo previamente una transmisión real UHF a una distancia aproximada de 2 kilómetros entre la edificación el faro ubicada en las instalaciones de la DIMAR y el Batallón 70 encontrando una gran similitud en los resultados encontrados.

El sistema de alerta temprana por variaciones extremas en el nivel del mar ha sido diseñado especialmente para detectar posibles eventos tsunamigénicos en la costa Pacífica Colombiana, sin embargo, este sistema puede ser adaptado a la vez como una estación de tipo meteorológica, lo que puede permitir la posible detección de las características principales de otros fenómenos naturales tales como el fenómeno de la niña y el niño. Esto se debe a que los sensores empleados en el diseño del presente sistema son capaces de monitorear simultáneamente los niveles de temperatura, conductividad y presión. Estos valores sensados en conjunto con una adecuada rutina acoplada al algoritmo computacional desarrollado en MATLAB, puede permitir la detección de posibles anomalías que corresponden a las principales características de estos fenómenos naturales.

6. RECOMENDACIONES

Profundizar en el manejo de herramientas informáticas de alto nivel que permitan el intercambio de información proveniente de las estaciones mareográficas con entidades que puedan requerir dicha información como herramienta de investigación.

Adaptar esta metodología aplicada para la detección y análisis de anomalías de la dinámica oceánica a otras regiones de la costa Pacífica colombiana, que cuenten con los datos batimétricos necesarios para la adaptación de modelos de propagación de olas tsunamis por medio del modelo numérico MOST.

Realizar pruebas in situ de transmisión de datos provenientes de sensores de presión fondeados a diferentes profundidades y a diferentes distancias de la línea costera del municipio de Tumaco, con el fin de obtener mayor claridad sobre la incidencia de los diferentes factores atmosféricos que pueden alterar el proceso de comunicación inalámbrica.

BIBLIOGRAFIA

CARDONA Y., 2004. Modelación de tsunamis en la Costa Pacífica colombiana, caso de aplicación bahía de Tumaco, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos.

GUTIÉRREZ J., 2009. Identificación de escenarios de riesgos por Tsunami para el litoral Pacífico colombiano a partir de la simulación de eventos tsunamigénicos, implementando el sistema de modelación numérica MOST (METHOD OF SPLITTING TSUNAMI).

Intergovernmental Oceanographic Commission UNESCO 2008. Glosario de Tsunamis.

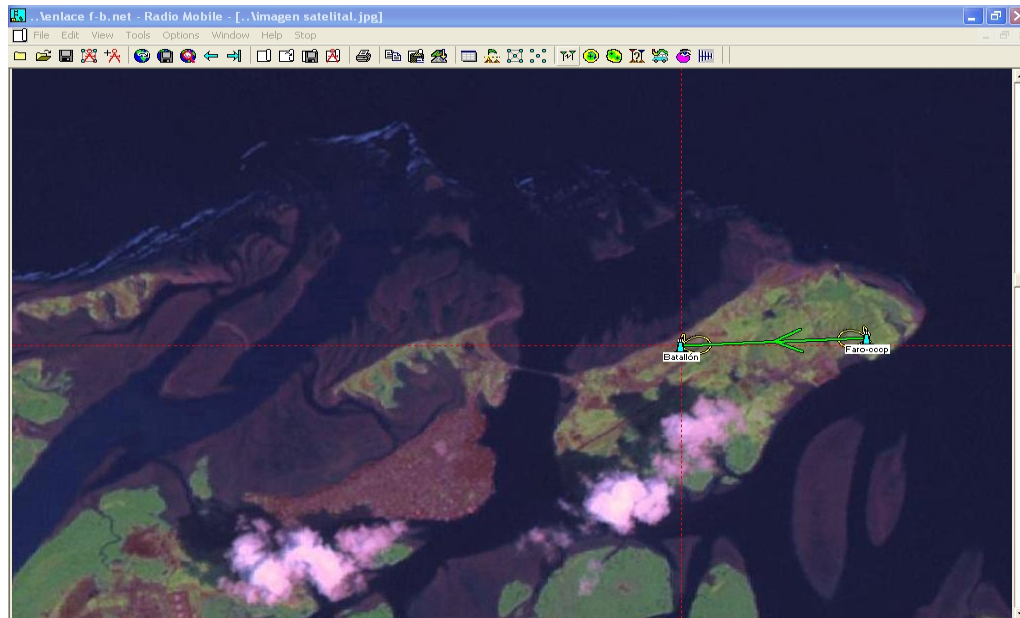
KENJI Satake, 2004. The 2004.Tsunamis: Case Studies and Recent Developments, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

IIDA, K., 1963. Magnitude, energy and generation and mechanisms of tsunamis and a catalog of earthquakes associated with tsunamis. Proc. of the 10th Pacific Science Congress Symposium. International Union of Geodesy and Geophysics U.G.G.I., Monograph 24.

REYNA J., 1997. Simulación numérica de un Tsunami de origen lejano en su Aproximación a la costa Pacífica colombiana. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Escuela de Oceanografía Física.

ANEXOS

Anexo 1. Simulaciones realizadas para la validación del programa Radio Mobile por medio de la comparación de los resultados obtenidos en la implementación del radioenlace Faro-Batallón. Fuente: Autor



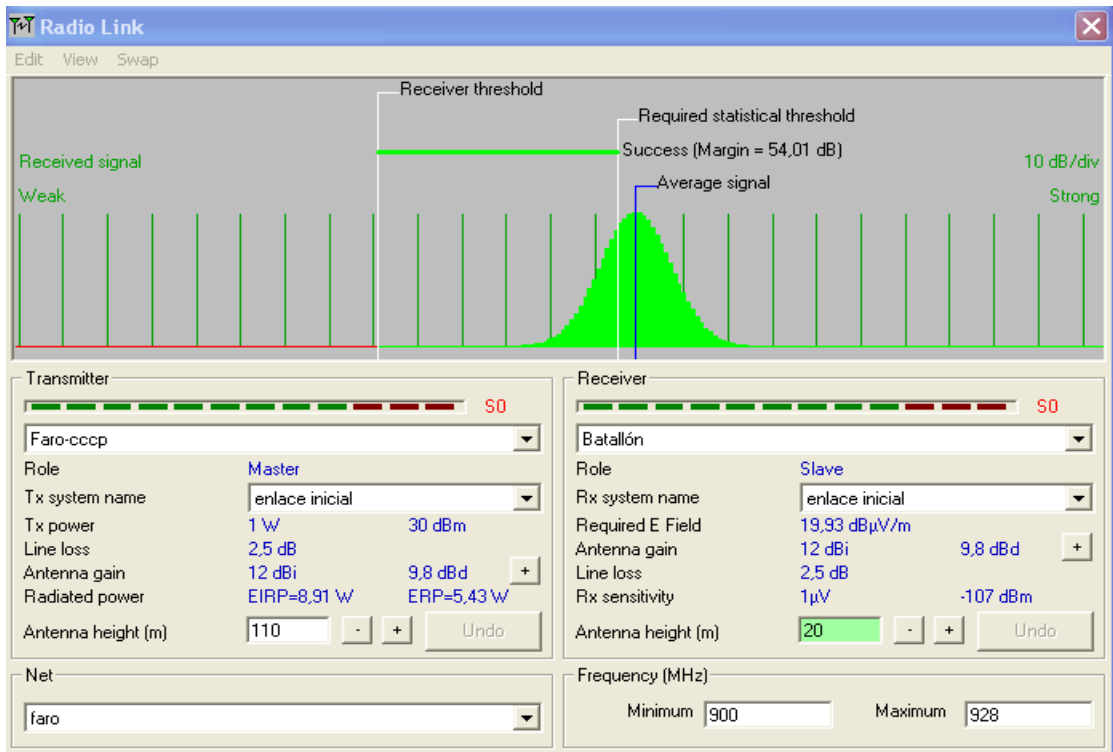
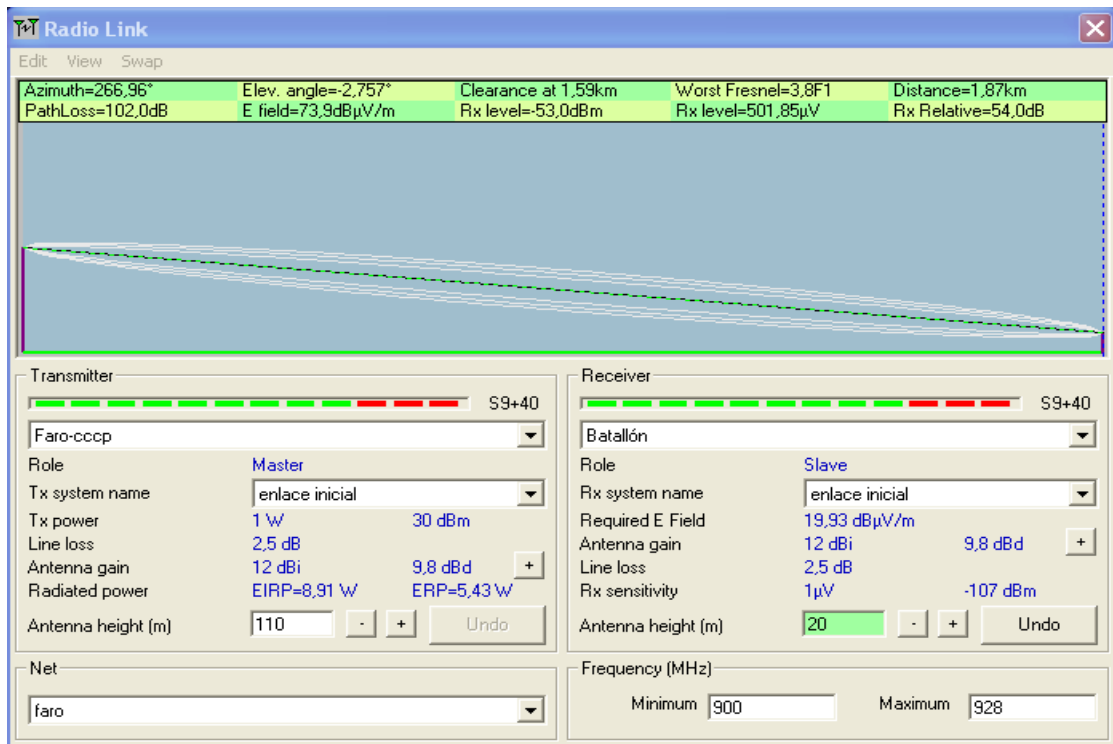
Radio Link

Edit View Swap

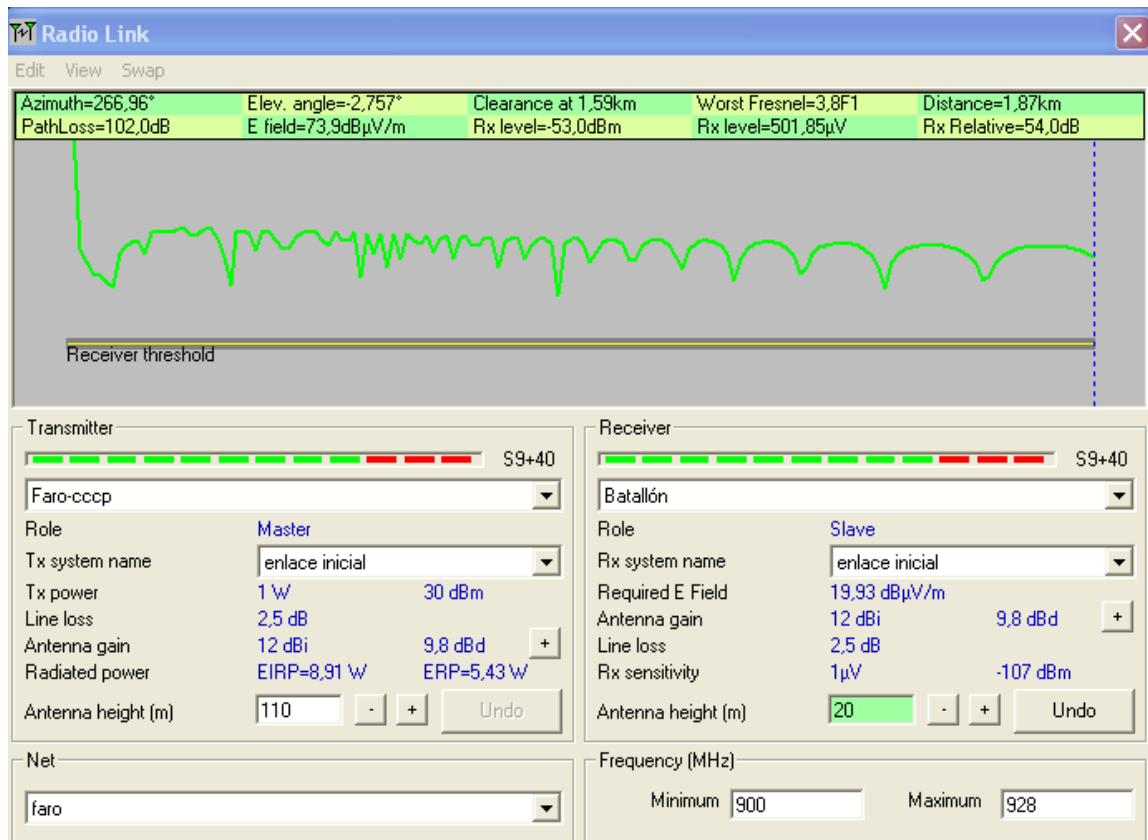
Distance between Faro-cccp and Batallón is 1,9 km (1,2 miles)
 True North Azimuth = 266,96°, Magnetic North Azimuth = 269,41°, Elevation angle = -2,7567°
 Terrain elevation variation is 0,0 m
 Propagation mode is line-of-sight, minimum clearance 3,8F1 at 1,6km
 Average frequency is 914,000 MHz
 Free Space = 97,1 dB, Obstruction = 0,8 dB, Urban = 0,0 dB, Forest = 0,0 dB, Statistics = 4,2 dB
 Total propagation loss is 102,0 dB
 System gain from Faro-cccp to Batallón is 156,0 dB (yagi.ant at 267,0° gain = 12,0 dB)
 System gain from Batallón to Faro-cccp is 156,0 dB (yagi.ant at 87,0° gain = 12,0 dB)
 Worst reception is 54,0 dB over the required signal to meet
 50,000% of time, 70,000% of situations

Transmitter		Receiver	
Role	Master	Role	Slave
Tx system name	enlace inicial	Rx system name	enlace inicial
Tx power	1 W 30 dBm	Required E Field	19,93 dBµV/m
Line loss	2,5 dB	Antenna gain	12 dBi 9,8 dBd
Antenna gain	12 dBi 9,8 dBd	Line loss	2,5 dB
Radiated power	EIRP=8,91 W ERP=5,43 W	Rx sensitivity	1µV -107 dBm
Antenna height (m)	110	Antenna height (m)	20
Net	faro	Frequency (MHz)	Minimum 900 Maximum 928

Detalles de los parámetros del enlace y perfil orográfico entre la estación transmisora (Faro-CCCP) y la estación receptora (Batallón 70). Fuente: Autor

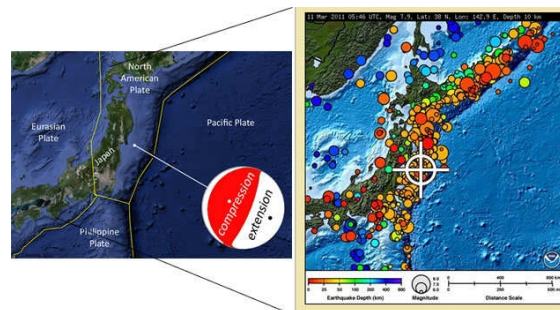


Distribución de la señal entre la estación transmisora (Faro-CCCP) y la estación receptora (Batallón). Fuente: Autor

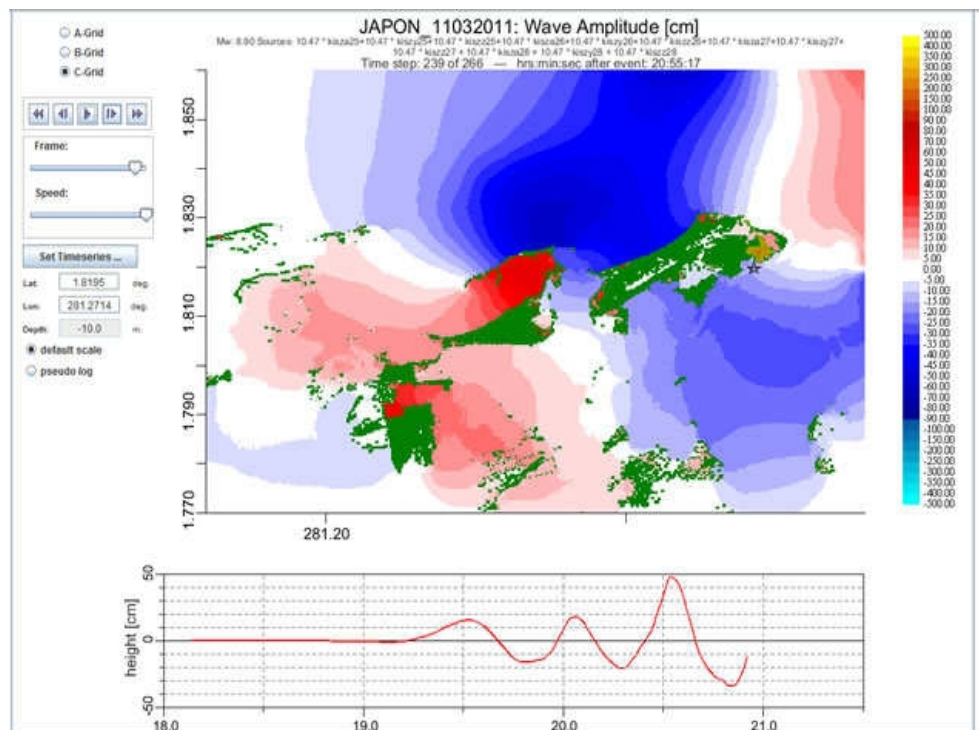


Anexo 2. Modelación Numérica realizada con el programa MOST del tsunami ocurrido en Japón el 11 de Marzo de año 2011, en donde se realiza el análisis del tiempo de arribo de la primera ola, la amplitud de la misma y posible amenaza de inundación al municipio de San Andrés de Tumaco. Posteriormente se realiza la comparación entre los datos registrados por la estación mareográfica de tipo radar ubicada en el muelle de Guardacostas de la base Naval y la señal sintética obtenida a través del MOST.

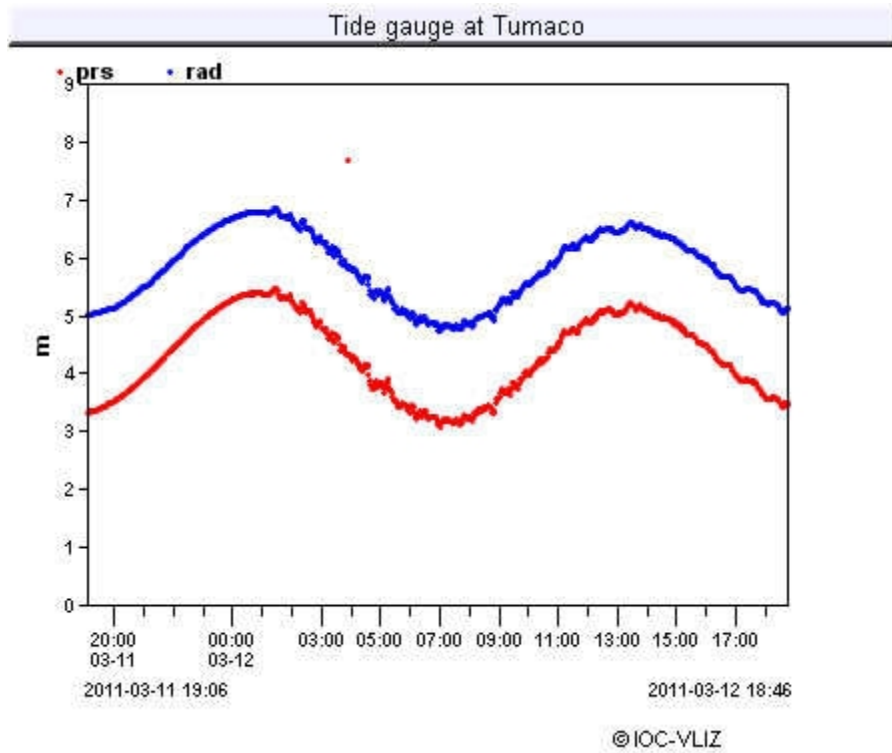
Localización del epicentro del sismo en Japón del 11 de marzo de 2011 y del área afectada por las constantes replicas.



Resultado de la modelación numérica del tsunami de Japón realizada con el Programa MOST para San Andrés de Tumaco.



Señal de la ola de tsunami de Japón registrada por el mareógrafo de la Dirección General Marítima sensor radar RLS (color azul) en Tumaco, Colombia y señal sintética producto de la simulación del evento realizada con el MOST (color rojo)..



Anexo 3.Codigo fuente del programa realizado en Matlab para la adquisición y procesamiento en tiempo real de los datos registrados por los sensores de presión. Fuente: Autor

```
%creación inicial del archivo de metadatos que contendrá los datos de
%profundidad, tiempo y bandera de calidad del dato del lugar

fid=fopen('almacenamientodial.txt','at');
fprintf(fid,'Depth [m]\tQF\tdate [yyyy-mm-dd hh:mm:ss]\n');
fclose(fid);

% el objetivo inicial es encontrar el valor medio de la marea según la
% profundidad a la que se coloca el sensor de presión, para esto se
realiza
% un sensado de marea de un día con toma de muestras cada 2 minutos y al
final
% de ese período se promedian los datos para obtener así el valor deseado

for i=1:1:720
    tmstl=clock;
    stl=fix(tmstl(5)); % tomo el valor de minuto correspondiente al
tiempo
                                % para posteriormente compararlo con el siguiente
                                % dato de tiempo hasta que se cumplan dos minutos

    QF=1; %decalaración de bandera de calidad del dato, tomada como
        %inicialmente como "Unknown quality"
    while QF~=0 % se hace esta comparación para saber si el
dato
                                % recibido es bueno, de lo contrario hara una
                                %nueva petición hasta obtener un buen dato

        %Petición de dato al sensor
        s1 = serial('com10','BaudRate',9600,'Timeout',1);
        fopen(s1);
        fprintf(s1, 'TS');
        dat=fscanf(s1,'%f');
        fclose(s1);
        %Calificación del dato a través de banderas
        if isspace(dat)==1
            QF=8; %Bad quality
        elseif dat>20
```



```

% Almacenamiento del dato en un vector para su posterior promedio
dh(i)=dat;
tmst2=clock;
st2=fix(tmst2(5));

% Búsqueda de tiempo para la siguiente toma de muestra
if st1>=(60-2)
    while st2~=(st1-60+2)
        tmst2=clock;
        st2=fix(tmst2(5));
    end

else
    while st2<(st1+2)
        tmst2=clock;
        st2=fix(tmst2(5));
    end
end
end

% Búsqueda del valor medio de marea según la profundidad a la que se
% encuentra el sensor
h0=0;
for i=1:1:720
    h0=h0+dh(i);
end
h0=h0/720;
alarm=0;
st1=0;
t1=clock;
mt1=fix(t1(5));
PROGRAMA(alarm,h0,st1,mt1) %redirecciona a el programa de recoleccion y
% analisis de datos

%Datos de amplitud, fase y frecuencia de armonicos de Tumaco
f=[28.984104;30;30.082137;28.439730;13.398661;13.943036;14.958931;15.0410
69;57.96821;58.984104;86.952312];
a=[1.239991452;0.403527436;0.162178699;0.296845972;0.006003765;0.02368328
4;0.057917401;0.099498019;0.01608095;0.004474161;0.002855991];
p=[48.86627726;172.0575402;349.6396397;304.4435731;273.0827801;306.919590
6;323.8889158;353.307154;121.9749351;208.0235054;59.92008293];

%creación inicial del archivo de metadatos que contendrá los datos de
%profundidad, tiempo y bandera de calidad del dato del lugar
fid=fopen('data.txt','at');
fprintf(fid,'h0=%4,4f\n',h0)
fprintf(fid,'Depth[m]\tQF\tdate [yyyy-mm-dd hh:mm:ss]\n');%formato de
fecha según norma iso 8601
fclose(fid);

```

```

%inicio de toma de datos
    tmst1=clock;
    stl=fix(tmst1(6));

    QF=1; %decalaración de bandera de calidad del dato, según el Ocean
Data View, tomada como
    %inicialmente como "Unknown quality"
    while QF~=0          % se hace esta comparación para saber si el
dato
                        % recibido es bueno, de lo contrario hara una
                        %nueva petición hasta obtener un buen dato

        %Petición de dato al sensor
        s1 = serial('com10','BaudRate',9600,'Timeout',1);
        fopen(s1);
        fprintf(s1, 'TS');
        Dsen=fscanf(s1,'%f');
        fclose(s1);
        %Calificación del dato a través de banderas
        if Dsen==' '
            QF=8; %Bad quality
        elseif (Dsen=='')
            QF=8; %Bad quality
        elseif Dsen>20
            QF=4; %Questionable quality
        else
            QF=0; %Good quality
        end

        % almacenamiento del dato en el archivo cada dos minutos

        tmst2=clock;
        mt2=fix(tmst2(5));
        if ((mt1+2)==mt2)||((mt1-58)==mt2)
            if Dsen==' '
                Dsen='n'; %cambio el valor si es por una "n" para
                %identificar el dato faltante por un dato

        % conversion de tiempo actual a hora serial para el cálculo de
marea,tomando
        %como dia de inicio es el 30 de diciembre de 1899 LST, se restan las
horas
        %seriales de este periodo en valor numérico
        %como en C no existe la función datenum() la hora serial se determina
asi:
        time=clock;
        ty=((time(1)-1900)*365+fix((time(1)-1900)/4)+mod(time(1),4))*24;
        tm=(datenum(time(1),time(2),0,0,0,0)-
datenum(time(1),0,0,0,0,0)+timeg(3))*24;
        % en C existe una función que me permite obtener el dia serial del año,
en
        % matlab no, por eso utilizo el datenum para hallar este valor
        td=time(4)+time(5)/60+time(6)/3600;
        t=ty+tm+td;

        %conversión a hora serial usando datenum()
        %t=(datenum(clock)-693960)*24;

```

