



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MARÍTIMA CIENCIAS
BIOLÓGICAS, OCEANOGRÁFICAS Y RECURSOS
NATURALES

“DETERMINACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA
IDENTIFICACIÓN DE UNA LÍNEA DE RETROCESO DE PLAYA
COMO HERRAMIENTA DE APOYO AL PROCESO DE
REORDENAMIENTO TERRITORIAL EN LA COSTA CASO DE
ESTUDIO PACOA”

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO OCEÁNICO CON MENCIÓN EN CIENCIAS
AMBIENTALES

DANIEL ANDRÉS GUEVARA MÁRQUEZ

PAMELA ALEXANDRA CAMPI ALVAREZ

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco afectivamente a Dios, a mis padres, profesores y amigos que me apoyaron en el desarrollo de mi formación profesional. Quiero mencionar de forma especial a la Máster Gina Andrade y al Ingeniero Gabriel Mantilla por su apoyo en el proceso de este proyecto.

Daniel Guevara Marquez

Agradezco eternamente a Dios por guiarme para tomar la excelente decisión de estudiar en ESPOL y por permitirme culminar esta etapa, también agradezco a mis padres el Dr. Luis Campi Segovia y la QF. Cecilia Alvarez Guerra por el apoyo y confianza que me brindaron siempre, a los profesores que formaron parte de este proceso académico y especialmente a la tutora de este proyecto Msc. Gina Andrade García, a André Alvarado Doylet por toda la motivación y apoyo incondicional en todos los momentos a lo largo de la carrera y a Ana Wong Gan por estar siempre que la necesité.

Pamela Campi Alvarez

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico de forma muy especial a mis abuelos Emilio, Isabel y Mariana; a mis padres Rubén e Ivonne, a mis hermanos y a toda mi familia. De igual manera, dedico este proyecto a todo el personal del Club Deportivo ESPOL, a mis amigos de la vida y a cada una de las personas que hicieron mi permanencia en ESPOL un tiempo de aprendizaje continuo y muy grato.

Daniel Guevara Marquez

El presente proyecto lo dedico a mis familiares, amigos de la universidad, compañeros del deporte y a todos los que estén interesados en apostar por este campo de la ciencia.

Pamela Campi Alvarez

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



Edgar Eduardo Cervantes B. MSc.

PROFESOR EVALUADOR



Gina María Andrade García MSc.

PROFESOR TUTOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

.....
Daniel Andrés Guevara Marquez

.....
Pamela Alexandra Campi Álvarez

RESUMEN

En este estudio se aborda el tema de erosión costera como una problemática que aqueja a la provincia de Santa Elena, específicamente a la playa de Pacoa. Desarrollar una herramienta comprensible y replicable que permita conocer el problema erosivo y el riesgo al cual están sometidas las diferentes playas para así tomar medidas de prevención y mitigación desde los altos mandos se proyecta como una de las soluciones para tener una mejor planificación de la zonificación en la costa y actuar ante posibles problemas que representen riesgos en la zona costera. Se ha solicitado un estudio técnico por parte del departamento de Gestión de Riesgos del Municipio de Santa Elena que permita demostrar que la playa de Pacoa se está erosionando y que la línea de inundación de agua está aumentando; por lo tanto, la metodología propuesta consta de dos fases, la primera corresponde a la demostración del retroceso de la línea de berma desde 1981 hasta inicios de 2018 y la segunda fase corresponde a proyecciones de líneas de inundación frente a diversos escenarios oceanográficos a partir del cálculo del Run – up. Se tomarán en cuenta diferentes escenarios oceanográficos como lo son el aumento del nivel del mar a causa del evento El Niño, oleaje de tormenta, aumento del nivel del mar por causa del cambio climático y una combinación de todos ellos en el caso más extremo. Las herramientas necesarias para el desarrollo de esta metodología son: cálculo del run-up para calcular la línea de inundación y el modelo Wave Watch III que pronostica un sistema global de olas en diferentes partes del océano lo que va a contribuir con el pronóstico del clima de oleaje en el punto de grilla más cercano a nuestra área de estudio. Para la demostración del retroceso de la línea de berma desde 1981 a la actualidad se utilizaron imágenes aéreas georreferenciadas obtenidas del Instituto Geofísico Militar (IGM) que fueron analizadas mediante la aplicación de métodos estadísticos a través de programas de libre acceso como RStudio y QGIS.

Palabras clave: erosión, prevención, zonificación, riesgos.

INDICE GENERAL

1. AGRADECIMIENTOS.....	II
2. DEDICATORIA.....	III
3. TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	IV
4. DECLARACIÓN EXPRESA	V
5. RESUMEN	VI
6. INDICE GENERAL.....	VIII
7. INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
8. MARCO TEÓRICO	4
CARGA POBLACIONAL EN LA ZONA COSTERA.....	4
ZONIFICACIÓN Y LEGISLACIÓN COSTERA.....	8
PROCESO EROSIVO EN LA COSTA	10
SOLUCIONES PARA PROTECCIÓN DE COSTA	13
AMENAZAS OCEÁNICAS FRENTE A LAS COSTAS	14
ESTRUCTURA DE LAS PLAYAS	16
METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE PENDIENTE EMERY	18
CÁLCULO DEL RUN-UP 2%	20
MODELO WAVE WATCH III	23
9. METODOLOGÍA	25
DESCRIPCIÓN DEL RETROCESO DE LA LÍNEA DE BERMA.....	25
1.1.1. <i>Obtención de Imágenes Históricas georreferenciadas</i>	25
1.1.2. <i>Calibración de Imágenes y definición del área de estudio</i>	26
1.1.3. <i>Definición de la línea Base</i>	29
1.1.4. <i>Identificación de Línea de Berma para cada año</i>	30
1.1.5. <i>Cálculo de distancia entre línea base y líneas de berma.</i>	32
1.1.6. <i>Determinación del retroceso de la línea de berma con respecto a la línea base.</i>	32
DETERMINACIÓN DE LÍNEAS DE INUNDACIÓN	33
1.1.7. <i>Establecer los valores de pendiente de playas.</i>	33
1.1.8. <i>Definición de Altura Significativa (H_s) y Periodo Pico (T_p)</i>	34
1.1.9. <i>Cálculo del Run – Up y Alcance Horizontal</i>	35
1.1.10.	D
<i>Definición de Escenarios de Inundación</i>	36

1.1.11.	C
<i>álculo de Líneas de Inundación</i>	36
10. RESULTADOS	39
RETROCESO DE BERMA.....	39
DETERMINACIÓN DE LÍNEAS DE INUNDACIÓN	40
11. ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
12. CONCLUSIONES	57
13. RECOMENDACIONES	58
14. REFERENCIAS	59
15. ANEXO 1	61
16. ANEXO 2	66

INTRODUCCIÓN

El perfil costero está en constante cambio, esto es debido a la presencia de fuertes oleajes, aumento del nivel del mar, cambios en la deriva litoral, entre otros procesos marinos y terrestres. Además, existe una presión sobre las costas gracias al desarrollo de construcciones cercanas al mar, aumentando el riesgo de que las edificaciones sufran daños a causa de las amenazas de procesos costeros como la erosión y efectos de fenómenos naturales como El niño, oleajes de tormenta o eventos de Tsunami. Mediante entrevistas con autoridades en el departamento de Gestión de Riesgo del Municipio de Santa Elena, se ha podido recoger información sobre los problemas que tiene esta provincia con respecto al proceso erosivo a la que está sometida.

El problema con el que se encuentra el área de gestión de riesgos del Municipio de Santa Elena, se encasilla en un problema técnico social con un tono político y ambiental ya que los dueños de los terrenos desean empezar las construcciones en ese sector que es vulnerable a los efectos del oleaje; sin embargo, el Municipio quiere hacer que los dueños desistan de esas construcciones para evitar posibles daños que se pueden suscitar a futuro tomando en cuenta que actualmente los dueños de las casas que están del otro lado de la playa ya han empezado a protegerse con construcciones de muros de protección al pie de sus casas para evitar que el agua ingrese y genere daños en su propiedad.

Por ese motivo, se nos ha solicitado que entreguemos un estudio técnico para demostrar que la playa se está erosionando y que la línea de inundación del agua está aumentando. Es por esto que con el método del cálculo del Run-up se espera obtener como resultado una línea de inundación que sirva de herramienta para la toma de decisiones en cuanto a la zonificación en las costas garantizando seguridad en las playas y posteriormente, se pueda lograr un reordenamiento a lo largo del perfil costero del país. Se plantearán diferentes escenarios para calcular la línea de inundación a partir de las condiciones actuales y en diversos escenarios como el aumento del nivel del mar por efecto del evento de El Niño, con oleaje de tormenta, aumento del nivel del mar por causa del cambio climático y una combinación de todos ellos en el caso más extremo. Es importante mencionar que

para el cálculo del Run-up se va a necesitar del modelo Wave Watch III que pronostica un sistema global de olas en diferentes partes del océano lo que va a contribuir con el pronóstico del clima de oleaje en el punto de grilla más cercano a nuestra área de estudio, y así lograr obtener los datos de altura significativa H_s y periodo T en aguas profundas. Como parte de la metodología también se realizaron varias salidas de campo para recolectar datos de las características litorales de la zona, determinar la pendiente y tomar puntos para dibujar la berma actual de la playa.

Como hipótesis se plantea que la playa de Pacoa se ha erosionado por lo que para demostrar el retroceso de la playa se va a realizar el análisis de la zona con imágenes aéreas georreferenciadas obtenidas del Instituto Geofísico Militar (IGM) que permitirán observar las condiciones del lugar de estudio en diferentes épocas y aplicando métodos estadísticos con la ayuda de programas de libre acceso como RStudio y QGIS, de esta forma se espera obtener líneas de retroceso costero para tener una proyección de lo que podría pasar en diferentes escenarios futuros.

La importancia de este proyecto se concentra en la herramienta metodológica que permitirá determinar una línea de retroceso de playa para otorgar a las autoridades competentes tener un respaldo técnico para la toma de decisiones en un proceso de zonificación del borde costero. Para nuestro caso de estudio, es importante establecer un límite para construcciones permanentes futuras, ya que son evidentes los problemas a los que se enfrentan las construcciones actuales, debido a que la playa se encuentra en constante erosión, obligando a sus residentes a establecer medidas de protección, alterando así el ecosistema playa.

Antes de esta propuesta no se han encontrado metodologías similares aplicadas a las zonas costeras del país para abordar temas erosivos enfocados al reordenamiento costero. Sin embargo, en otras partes del mundo como en Australia, España, México y Los Estados Unidos de América se han realizado estudios en la zona costera enfocados principalmente a la planificación y ordenamiento y manejo de los recursos costeros; también se ha estudiado la costa con la finalidad de conocer los procesos que dominan la dinámica de la zona y plantear soluciones a los problemas causados por el clima de oleaje sobre todo en Europa y en los Estados Unidos de América. Por este motivo, el proyecto se perfila

a lo que sería un primer paso para el monitoreo del retroceso en las playas de Santa Elena como herramienta para la planificación y ordenamiento costero en el futuro, empezando por la provincia de Santa Elena y posteriormente que sea replicada por el resto de país. De esta manera se estaría aportando al plan del buen vivir que propone el gobierno del Ecuador con el objetivo de brindar una mejor calidad de vida.

Objetivo General

Determinar una metodología básica para la identificación de una línea de retroceso costero como herramienta para lograr un reordenamiento en la zona costera e identificar la línea de inundación en la playa de Pacoa que permita tomar decisiones en cuanto a la planificación de construcciones futuras.

Objetivos Específicos

- Demostrar que la playa de Pacoa es una zona altamente erosiva por lo que se debe tener precaución en la planificación para la construcción de nuevas estructuras.
- Obtener características específicas de la zona de estudio para facilitar el desarrollo del estudio y conocer la dinámica de la playa.
- Aplicar métodos empíricos para calcular el run-up, la línea de berma y el alcance horizontal de inundación.
- Aplicar herramientas de programación y estadística que reduzcan los errores y permitan obtener resultados confiables.
- Presentar una metodología que pueda ser replicada por todo el perfil costero y que a largo plazo se pueda alcanzar un mejor manejo de los recursos costeros en el país.

MARCO TEÓRICO

Carga poblacional en la zona costera

Es muy común ver las playas abarrotadas de visitantes durante un periodo vacacional, también es notorio que con el pasar de los años el perfil costero se ha desarrollado de tal manera que los habitantes de esta zona han cambiado su dependencia, según entrevistas realizadas por estudiantes de ESPOL en el 2016 a los habitantes de Libertador Bolívar, en muchos pueblos costeros se han perdido los hábitos de pesca y comercialización del recurso, y más bien han empezado a dedicarse a labores de albañilería como respuesta a la gran demanda de nuevas construcciones que se levantan en el perfil costero; además comentan que la fuente de ingreso indiscutiblemente es el turismo principalmente en época de temporada y sobre todo en feriados por lo que han optado por el comercio de ropa, bisutería y alimentos.

La economía de estos sectores turísticos se maximiza gracias a los inversionistas que apuestan a la construcción de conjuntos residenciales y hoteles con vistas al mar, restaurantes, carreteras, malecones y otras facilidades de acceso a la playa, que llama la atención de turistas locales y extranjeros. Aunque el turismo es visto de manera positiva para el crecimiento mediante generación de divisas, empleo y crecimiento regional, también se cuestiona sus efectos negativos relativos al desarrollo en cuanto a lo ambiental y social tomando en cuenta que estos recaen en las poblaciones locales (Lemay, 1998).

En el caso específico de Pacoa, que es una playa que pertenece a la provincia de Santa Elena, ubicada en el cantón Santa Elena, entre Monteverde y San Pablo; según información obtenida por medio de una entrevista personal con el director del área de Gestión de Riesgos del Municipio de Santa Elena, el Ingeniero Richard Flores, existen casas que fueron construidas en la década de los 80 con permiso de construcción de la DIRNEA (Dirección Nacional de los Espacios Acuáticos), que según registros de la capitanía de marina se identificaban 12 metros de distancia desde la zona de construcción hasta la línea de playa en marea alta. Los procesos erosivos se han notado a lo largo de la provincia de Santa Elena, una evidencia la encontramos en el alargamiento del muro de protección de la carretera en San

Pablo el cual se lo ha llevado a 800 metros más de su diseño original según nos informó el Ingeniero Richard Flores. También manifestó que la modificación de la carretera cercana a la playa es otra evidencia clara de los problemas erosivos, mencionó que existen planos donde se muestra que la carretera estaba diseñada para tener una trayectoria recta, sin embargo, por motivos de la dinámica de playa se vio en la necesidad de rediseñar la carretera para que tenga una trayectoria curva como lo podemos ver actualmente. Todo esto se reúne como evidencia para argumentar la hipótesis de que esta zona costera es propensa a erosión producto del clima de oleaje al que es sometida.

La playa en estudio tiene aproximadamente 1.5 Km de extensión, es una zona tranquila, donde no existe mayor movimiento ni de residentes ni de visitantes. Más de la mitad de la playa tiene construcciones de casas frente al mar, y la otra parte no está construida, pero los terrenos ya han sido vendidos en años anteriores, sin embargo, los dueños aún no han iniciado el proceso constructivo.

Por otro lado, el Ingeniero Richard Flores comenta que antes del evento El Niño de 1997 existió una cancha de tenis en ese lugar y que actualmente se puede apreciar que está destruida, y según versiones de personas que conocieron el lugar antes de El Niño, afirman que el mar llegó hasta la carretera por la que se puede transitar en estos días.

El ordenamiento costero es un tema del que se habla poco o nada en Ecuador como consecuencia del desconocimiento del gran número de factores que intervienen en la selección de los parámetros a considerar, así como el limitado conocimiento del rol que desempeña el ecosistema playa y su capacidad de responder frente a determinados usos (Lemus, 2014). Muchas familias se han asentado en las zonas costeras muy cerca del mar. Algunos fenómenos como El Niño provocan fuertes daños sobre todo a estas personas que viven cerca de la costa, pero a pesar de esto, buscan métodos alternativos para mantenerse protegidos frente a las amenazas del mar (Catalán, Cienfuegos, Osorio , & Da Fontoura Klein, 2014).

El crecimiento poblacional en las zonas costeras se ha hecho evidente en distintas partes del mundo, es así como el CIESIN (Center for International Earth Science Information Network) y el Banco Mundial han realizado estudios para levantar una

base de datos con información sobre el aumento de densidad poblacional en las zonas costeras en el mundo y América Latina desde 1990 hasta una proyección para el 2100. En la figura 1 en el gráfico superior se puede apreciar la población relativa en color gris y en color crema el espacio de tierra relativa a esa población para el 2010 en los países de América Latina, y en la parte inferior del mismo gráfico se puede observar la densidad poblacional de esos países para los años 2100 (rojo), 2010 (azul), 2000 (amarillo) y 1990 (verde). Lo que se puede decir de este primer gráfico es que la densidad poblacional de habitante por kilómetro cuadrado ha ido aumentando progresivamente y que Haití y República Dominicana son los países más vulnerables tomando en cuenta que están en una isla propensos a fenómenos naturales constantemente. Pero si nos enfocamos sólo en las zonas costeras con elevación menor a 10m con respecto al nivel del mar o LECZ (Low Elevation Coastal Zone) (Catalán, Cienfuegos, Osorio , & Da Fontoura Klein, 2014) de color naranja en el gráfico inferior de la figura 1, es evidente que Brasil, México y Argentina son los países que están en mayor riesgo debido a que su densidad poblacional supera el área de zonas de baja elevación.

Si observamos el caso de Ecuador, es un país que tiene aproximadamente 10.000 Km^2 y aproximadamente 3 millones de personas proyectadas para el 2100 en esas zonas. Esto nos lleva a pensar que es posible tomar medidas preventivas que logren evitar que la disponibilidad de tierra por persona sea insuficiente y la vulnerabilidad por aumento de la erosión e inundaciones aumente.

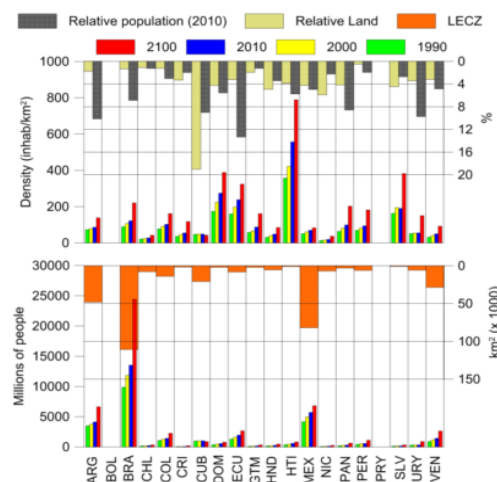


Ilustración 1. Población total y relativa al total en cada país, densidad poblacional y LECZ para cada país de América Latina. Fuente: (Catalán, Cienfuegos, Osorio , & Da Fontoura Klein, 2014).

De esta forma la zona costera a nivel global tiene una tendencia creciente debido a la demandas de acuerdo a las actividades que ahí se desarrollan y como respuesta a esto, se intensifican los conflictos en la utilización de tierra, además de la competencia y demanda de espacio para y su consecuente incremento del valor de suelo por lo que representa estar a la orilla del mar (Lemus, 2014).

Como ejemplo de estudios con respecto a líneas de retroceso costero para disminuir el riesgo en estas zonas, se encuentra el caso de estudio de Narrabeen en Australia, donde fue aplicada una metodología para determinar estas líneas de retroceso contemplando diferentes factores oceanográficos y socio-económicos.

En la ilustración 2 se puede observar un mapa de la playa de Narrabeen en Australia para el 2010 (a) y para el 20100 (b) donde se han dibujado 2 líneas de retroceso costero. La línea azul corresponde a la línea de retroceso obtenida por un método adaptado utilizando información histórica de la zona; mientras que la línea negra representa la línea de retroceso económica (Jongejan, Ranasinghe, Wainwright, Callaghan, & Reynolds, 2016). Estas líneas fueron dibujadas debido a la tasa erosiva de la zona, por lo que las líneas delimitan la zona de seguridad en la playa. La diferencia entre ambas tiene que ver con la actividad que se realiza en cada zona de la playa. Considerando la actividad económica que tienen las playas, las personas están más dispuestas a asumir los riesgos en sus negocios, es por esto que la línea negra está más cerca del mar que la línea azul en ambos casos. Mientras más cerca de la playa estén las construcciones, serán más afectados (Jongejan, Ranasinghe, Wainwright, Callaghan, & Reynolds, 2016).

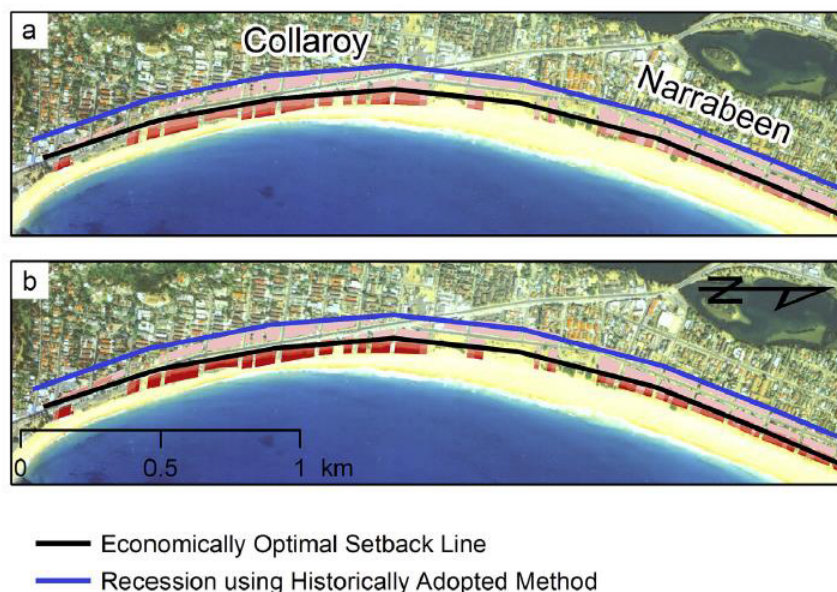


Ilustración 2. Mapa del riesgo económico de la playa de Narrabeen, Australia. Fuente: (Jongejan, Ranasinghe, Wainwright, Callaghan, & Reynolds, 2016)

Este caso de estudio en Australia publicado en el documento “Drawing the line on coastline recession risk” fue la inspiración para realizar el trabajo en la playa de Pacoa considerando ciertas diferencias en cuanto a la metodología, pero con el fin de obtener resultados parecidos,

Zonificación y Legislación Costera

Un aspecto muy importante para el ordenamiento costero tiene con ver con las leyes y regulaciones que se deben tomar en cuenta para el manejo de los recursos costeros. A nivel internacional existe un claro ejemplo en España, donde se ha desarrollado una ley de costas que entró en vigor en mayo de 2013, cuyo objetivo es garantizar la protección ambiental y el desarrollo sostenible del litoral de España. Además, busca preservar las playas vírgenes estableciendo límites en cuanto a las ocupaciones y actividades que ahí se realizan. La ley de Costa prohíbe nuevas edificaciones en la franja litoral y también prohíbe cualquier incremento de las estructuras que ya han sido construidas anteriormente (Gobierno de España, 2017).

Según la ley de costas de España, se distinguen 3 franjas de la playa que se ven afectada por esta ley, estas son:

1. Dominio público marítimo-terrestre: Se trata de un terreno de dominio público integrado por bienes que por definición constitucional gozan de un carácter inalienable, imprescriptible e inembargable.
2. Servidumbre de protección: se identifica una zona de 100 metros medida tierra a dentro desde el límite interior de la ribera del mar. En esta zona existe propiedad privada, pero se limitan las instalaciones y obras permitidas
3. Zona de influencia: con una distancia de 500 metros a partir de la ribera del mar, y donde las edificaciones a desarrollar deberán ir acorde con la del resto del municipio.

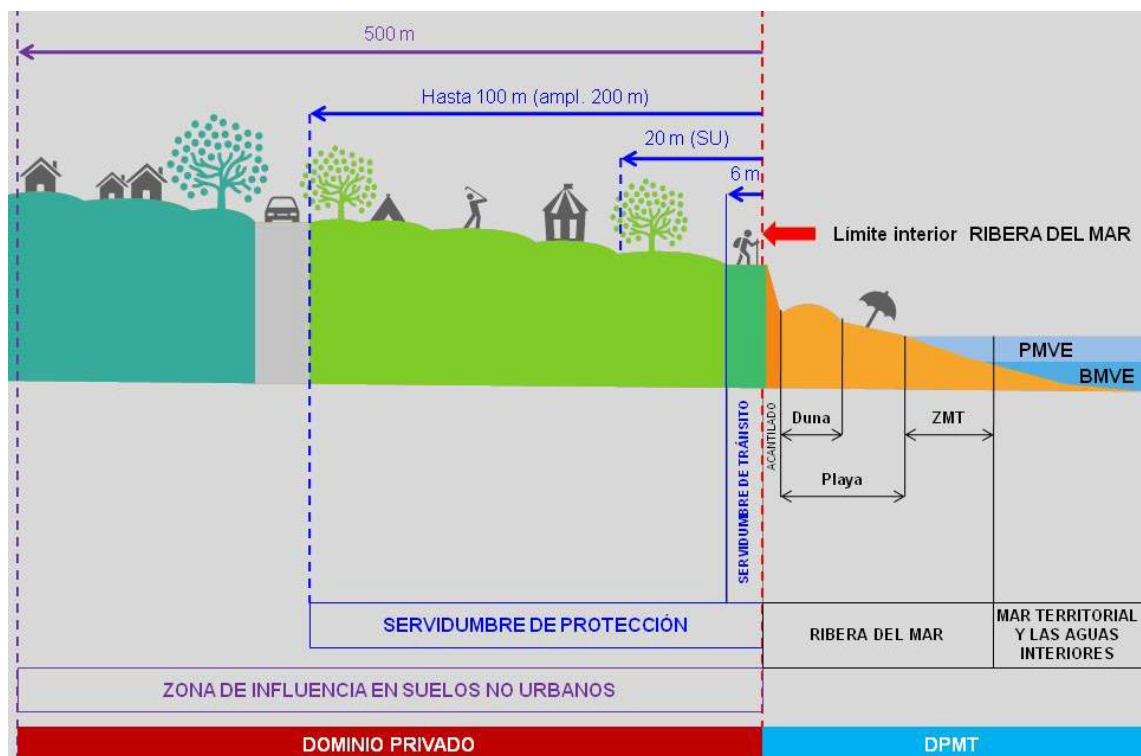


Ilustración 3. Bienes de dominio público- terrestres y servidumbres legales. Fuente: Gobierno de España.

Como se puede observar en la ilustración 3, las 3 franjas están bien definidas según lo establece la ley de costas en España. Lo que se espera con este ordenamiento en las costas es mitigar los problemas a los que actualmente se enfrenta la zona costera de España.

Para el caso de Ecuador, la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) es la encargada de establecer el ordenamiento territorial oceánico y marino costero para articular las diversas intervenciones humanas de manera

coherente, para generar intervenciones públicas oportunas y dirigidas a la realización de los objetivos delineados en el Plan Nacional para el Buen Vivir (PNBV) (Gobierno de Ecuador, 2017).

La legislación ecuatoriana según el Código Orgánico Ambiental (COA) en la sección de “Playa y de la franja adyacente de titularidad del estado y particulares”, el artículo 265 establece que las playas son de acceso público, libre y gratuito para los usos comunes acorde a su naturaleza. Además, se prohíbe la construcción, con carácter permanente, de edificaciones en la playa. Se exceptúan de esta prohibición las obras que el Estado construya por razones de defensa, seguridad u otras, mismas que deberán cumplir con la normativa ambiental vigente (COA, 2017).

En esa misma sección, pero en el artículo 266, trata de la franja adyacente de titularidad del Estado, que se caracteriza por la posibilidad de realizar en ella el asentamiento de infraestructura para el uso y goce de la playa. Dentro de esta franja se otorgarán las concesiones pertinentes, según corresponda, en consideración al manejo sustentable de la zona marino-costera y con el aval del Gobierno Autónomo Descentralizado competente de no estar ubicado en zonas de riesgo (COA, 2017). Además, como parte de la legislación ecuatoriana está el decreto 006 de la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, el cual prohíbe la construcción de nuevas estructuras en zona de berma. Es importante destacar que para este punto existe una brecha bien amplia ya que no se ha definido en el glosario de la legislación ecuatoriana lo que es zona de berma. Por lo tanto, este término hasta ahora depende de la interpretación que se le dé según convenga. No obstante, por medio de una entrevista con el Ingeniero Richard Flores se conoce que se están organizando las autoridades competentes en temas marino-costeros como el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) para finalmente tener una definición única de zona de berma y diferentes áreas que contempla la zona costera.

Proceso Erosivo en la Costa

Es importante mencionar los mecanismos naturales que de una u otra manera generan modificaciones a lo largo de la línea de costa. La energía que aportan las

olas, los vientos y las corrientes están participando en los cambios que se puedan evidenciar en la zona costera (Fidalgo, 2013). Estos mecanismos pueden ser: corrientes de marea, oleaje, huracanes, tsunamis.

En este documento nos vamos a enfocar en el proceso de erosión, por lo que la erosión costera se puede definir como el avance del mar sobre la tierra, medido en un periodo de tiempo suficientemente amplio para eliminar las fluctuaciones del clima, de los temporales y de los procesos sedimentarios a nivel local (Doody, y otros, 2005). La erosión costera conlleva tres tipos de impactos que a su vez pueden ser considerados como riesgos:

- Pérdida de superficie, con un valor económico, social o ecológico.
- Destrucción de las defensas costeras naturales por los temporales, las que se conocen como dunas, lo que hace que la zona sea vulnerable a inundaciones.
- Deterioro de las obras de protección, que también favorece el riesgo de inundación.

La erosión costera es el resultado del impacto acumulado de varios factores, algunos naturales y otros inducidos por las actividades humanas, por lo que no debe considerarse un único factor como origen del problema. En Europa, según el documento EUROSIÓN realizado en el 2005 se afirmaba que el 16% de su población vivía en los Municipios costeros con tendencia creciente. Ocasionando un gran impacto en la parte ambiental como resultado de las construcciones residenciales y construcciones de protección costera, además de la extracción del material sedimentario para fines del sector constructivo.

Todos los países costeros de la Unión Europea están afectados por la erosión costera. En el 2004, aproximadamente 20.000 kilómetros de costa de la Unión, un 20% del conjunto, se han visto afectadas por serios impactos. En la mayor parte de las zonas afectadas existe un retroceso efectivo de la línea de costa (15.100 km), a veces a pesar incluso de las obras de defensa (2.900 km). Además, existen otros 4.700 km de costa que han sido estabilizados artificialmente (Doody, y otros, 2005).

En Ecuador los procesos erosivos no han sido estudiados como se ha hecho en Europa; sin embargo, es evidente el proceso erosivo en diferentes playas del país, como publica el diario El Universo en una entrevista con los habitantes de Jambelí

en la provincia de El Oro, que recuerdan que hace más de 20 años había que caminar cerca de 200 metros desde el malecón hasta llegar al mar, y que esa distancia se ha reducido a 5 metros debido a fenómenos naturales como aguajes y oleajes (Macas, 2010). Por otro lado, según conversaciones con la Directora de Asuntos Marino Costeros de la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES), Liliana del Rocío Rendón, se han desarrollado estudios erosivos cualitativos en diferentes playas de Manabí.

En las ilustraciones 4 y 5 se puede observar dos playas de Manabí, San Clemente y Las Tunas, que presentan evidencias de procesos erosivos. En San Clemente se observa la construcción de un muro como protección de la carretera. Por otro lado, en Las Tunas no se observa presencia de estructuras de protección, ni de asentamientos humanos cercanos a la costa por lo que la vegetación presente evita que la línea de inundación penetre hacia el pueblo.



Ilustración 4. Playa de San Clemente erosionada. Sitio web: Ecuador Beaches.



Ilustración 5. Playa Las Tunas. Sitio web: Ecuador Beaches.

Soluciones para protección de costa

Concientizar sobre riesgos costeros, como la erosión e inundaciones, en el ordenamiento litoral dan espacio a el planteamiento de 4 tipos de soluciones como lo son el retroceso estratégico, la no actuación, la actuación limitada con implementación de soluciones alternativas y el mantenimiento del trazado de costa que incluyen la adopción de soluciones duras y/o alternativas (Red Atlántica para la Gestión de los Riesgos Costeros, 2017). Los métodos comúnmente utilizados se relacionan en función a respuestas a problemas erosivos. Un método, conocido como “duro” o “rígido” tienen como consecuencia fijar la línea de costa y su principal función es proteger de forma directa o inmediata la zona costera de las amenazas que representa el océano. Espigones, diques, muros de protección, rompeolas, entre otras obras ingenieriles pertenecen a este grupo de soluciones “duras” las cuales cumplen normalmente con sus objetivos, sin embargo, se ha demostrado que presentan, a medio plazo, situaciones adversas que demuestran ser negativas debido a la modificación de la dinámica natural del medio, por ejemplo, la erosión en zonas costeras próximas a la zona protegida.

Los métodos que tienen un enfoque más medioambiental son conocidos como métodos “blandos” o “flexibles”, estos métodos están direccionados a trabajar con la naturaleza mediante la integración de la dinámica costera y el movimiento de la línea de costa, como por ejemplo la restauración dunar o el relleno de playa con sedimentos. A pesar de que resulta una solución amigable con el ambiente, están en dependencia de cambios climáticos mundiales y locales llegando a ser

reversibles. La eficacia de estos métodos requiere una valoración respecto a la dinámica costera local, lo cual nos permite establecer una estimación de la vida útil y resistencia de la solución (Red Atlántica para la Gestión de los Riesgos Costeros, 2017).

Según el documento EUROSION, en el año 2001, en Europa, los proyectos para prevenir y proteger la erosión ocupaban alrededor de 7,600 km de costa, correspondiendo en un 70% la utilización de técnicas duras. Desde principios de los años 90, países como Reino Unido y Francia han demostrado que la implementación de la reubicación controlada, la cual consiste en el abandono de zonas de riesgo y la reinstalación de los bienes tierra adentro, puede ser una opción razonable desde el punto de vista económico y eficiente desde el punto de vista ambiental (Doody, et al., 2005).

Los estudios y monitoreo de erosión costera en Ecuador no llegan a un nivel eficiente, por consecuente la aplicación de las diversas metodologías para solucionar temas referentes a protección, prevención y mitigación de procesos erosivos en la costa ecuatoriana son muy pocos. Sin embargo, se han implementado medidas de protección en carreteras que cruzan el borde costero, además de obras de ingenieriles como escolleras paralelas a la costa en la playa Jambelí y La Libertad en la provincia de El Oro y Santa Elena respectivamente. Un desafío permanente en la toma de decisiones respecto a las soluciones frente a problemas erosivos en el borde costero es la concientización de las personas frente al riesgo y a las medidas de mitigación dispuestas a tomarse.

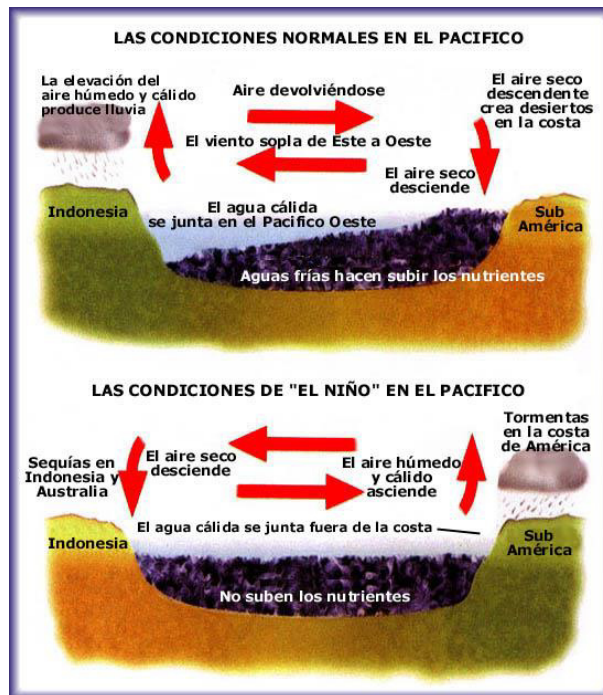
Amenazas oceánicas frente a las costas

Un evento natural que afecta a todas las zonas costeras del mundo es el aumento del nivel del mar que se produce principalmente por factores vinculados con el cambio climático (National Geographic, 2010). Según el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) estima que, durante el siglo pasado, el aumento global del nivel del mar ha oscilado entre 1,7-1,8 mm / año.

La consecuencia puede ser devastadora dependiendo de la energía con la que el mar penetre en las zonas costeras, causando estragos por inundación y

maximizando el problema erosivo, y además provocando impacto negativo a la flora y fauna costera. Considerando que como se vio previamente, la tendencia de asentamientos en las zonas de baja elevación es creciente, se elevaría el riesgo ocasionado por el clima de oleaje, obligándolos a buscar soluciones estructurales o no estructurales para mantenerse a salvo de la amenaza. (National Geographic, 2010). Sin embargo, el riesgo de ciclones tropicales ha se ha reducido en algunas regiones como en Estados Unidos a pesar del aumento de la población costera. En otras regiones como en América Central, América del Sur y Asia la vulnerabilidad ha disminuido también debido a la mejora de los sistemas de alerta temprana, a los métodos modernos aplicados a las nuevas construcciones, y la reforestación de las costas (Catalán, Cienfuegos, Osorio , & Da Fontoura Klein, 2014).

En Ecuador no se tienen registros asociados a eventos naturales como ciclones ya que las condiciones océano-atmosféricas son bastante estables en esta región; sin embargo, el principal fenómeno que aqueja a esta región es el fenómeno de El niño. Es un evento natural que se genera cuando la temperatura superficial del mar frente a las costas ecuatorianas supera la temperatura promedio, es decir, cuando se calienta el agua de manera inusual; además la intensidad de vientos se debilita y cambian su sentido normal desde las costas de América hacia las costas de Australia; como consecuencia el transporte de masas de agua acarreado por los vientos genera una acumulación de agua del lado este del Océano Pacífico (Pinto U., 2016). Adicionalmente, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que se ve como un cordón de nubes sobre la parte norte de América del Sur, se mantiene sobre esta zona provocando intensas lluvias que sumado al aumento del nivel del mar producto de la acumulación de agua por el cambio en las condiciones oceanográficas, generan inundaciones en las zonas costeras y cambios en los patrones biológicos de diferentes especies. En la ilustración 6 se presenta un esquema de las condiciones normales y de El Niño en el Pacífico.



*Ilustración 6. Esquema de las condiciones en el Pacífico. Obtenido de:
<http://www.creces.cl/new/index.asp?imat=++%3E++9&tc=3&nc=5&art=828>*

Frente a esta problemática, nuestro proyecto propone una metodología para el monitoreo del proceso erosivo y proyección de líneas de inundación que permita identificar líneas de retroceso costero que sirva como herramienta a los Municipios costeros a la hora de tomar decisiones referentes a planificación y ordenamiento costero; para aplicar esta metodología, es importante conocer y entender ciertos conceptos y métodos que serán utilizados para el desarrollo de la investigación.

Estructura de las playas

Se presenta a continuación una clasificación de las distintas partes que conforman la playa según el libro Coastal Engineering Manual:

- Trasplaya (Backshore): sector de la playa comprendida entre la línea de marea alta (o cresta de la berma) hasta un acantilado, duna o vegetación.
- Frente de playa (Foreshore-Beach face): sector de la playa comprendida entre las líneas de marea alta (o cresta de la berma) y marea baja.

- Anteplaya (Inshore-Shoreface): área delimitada entre el nivel de marea baja y la zona de rompiente.
- Plataforma (Offshore): porción comparativamente plana del perfil de playa, comprendida entre la zona de rompiente y el borde de la plataforma continental.
- Zona de rompiente (breaker zone): donde se alcanza la altura de ola máxima, y en la que los efectos de fricción con el fondo impiden que continúe la traslación de la ola con esas características, provocando su rotura
- Zona de surf (surf zone): zona en donde la ola, una vez que ha roto, avanza hacia la línea de costa formando un resalte (bore) en el frente de ola.
- Zona de swash (swash zone): cuando, tras la rotura de la ola, el resalte llega a la línea de costa, la ola asciende/desciende por la playa.

Perfiles de playa dependiendo de la época del año:

- Perfil de Verano: Se caracteriza por deposición de sedimentos traídos por el oleaje de la zona, es decir, se forma playa.
- Perfil de Invierno: Se caracteriza por disminución de los sedimentos que se encuentran en la playa por lo que el oleaje en esta época es más intenso y se lleva gran parte de la arena que se encuentra en la playa provocando una pérdida del perfil de la playa.

Dependiendo del tipo de pendiente que tenga la playa, se las puede clasificar en reflectivas y disipativas (DAVIDSON-ARNOTT). Las playas reflectivas son las que se caracterizan por tener una playa con una pendiente muy empinada y por no tener una zona de surf muy ancha, la energía del oleaje es reflejada; mientras que las playas disipativas se caracterizan por tener una pendiente muy suave y una extensa zona de surf por lo que la ola rompe y avanza perdiendo energía hasta que llega a la orilla. El tipo de ola más común en este tipo de playas son Plungin y Spilling respectivamente (Universitat Politècnica de Catalunya, Capítulo 2, 2018).

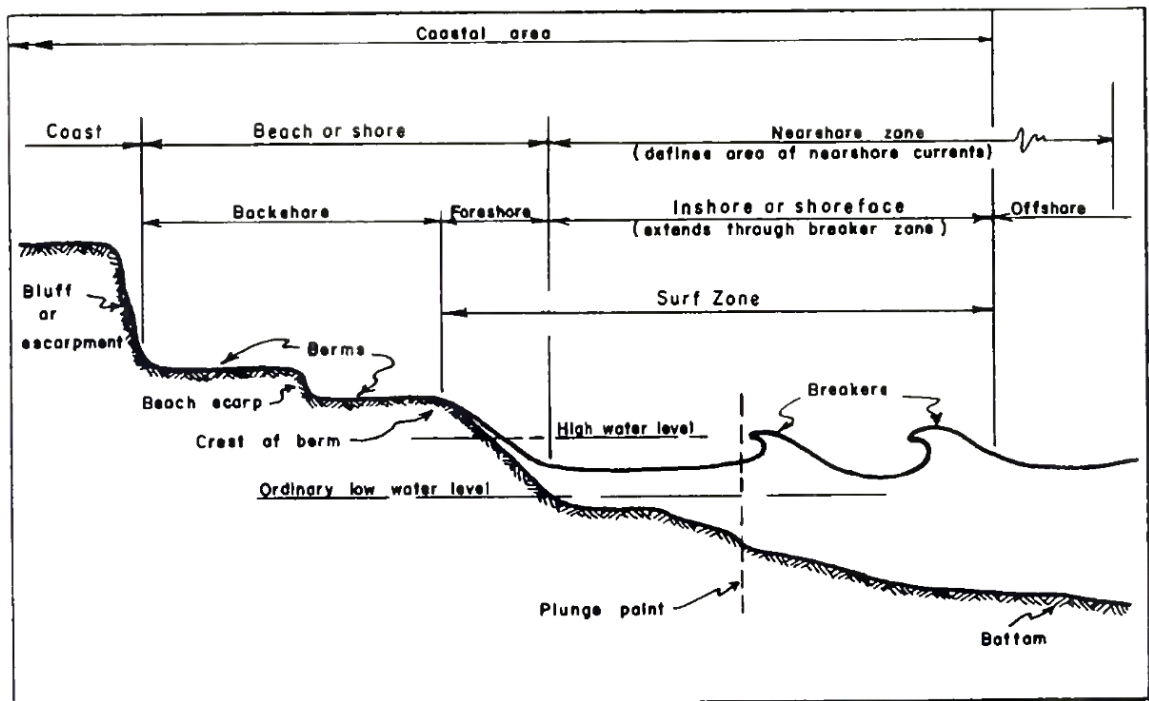


Ilustración 7. Zonificación playa. Fuente: CERC 1984.

Metodología de estimación de pendiente Emery

Este método fue creado en 1961 por el científico K.O. Emery, es uno de los más simples utilizado para medir perfiles de playa debido a su portabilidad y bajo costo. El método consiste en colocar 2 estacas de madera separadas 1.52 m, cada una graduada en cm una frente a la otra, empezando desde la zona de berma de la playa avanzando 1.52 m hasta llegar lo más cerca de la orilla (DWIGHT A. WEBSTER). Dependiendo del desnivel o la inclinación que tenga la playa, se va a obtener una diferencia entre ambas estacas, valor que es anotado por una de las personas en la hoja de registros.

Esta diferencia se obtiene colocando ambas estacas una frente a la otra, separada por 1.52 m, el observador que se encuentra con la estaca más lejana de la orilla nivela el borde superior de la estaca más cercana a la orilla con el horizonte y hace una proyección de ese nivel hacia su estaca como se muestra en la ilustración 8. Como cada estaca está graduada, se registran los valores observados en cada una y luego se hace la diferencia entre ambas. Este procedimiento se realiza en cada punto hasta llegar a la zona más plana o hasta llegar al mar.

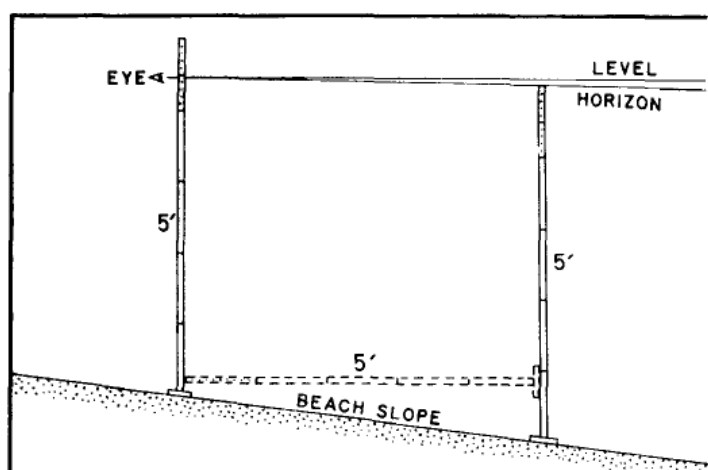


Ilustración 8. Método Emery para el perfil de playa. Obtenido de: A Simple Method of Measuring Profile.

Lo ideal es obtener la mayor cantidad de puntos para lograr una buena aproximación de la inclinación de la playa por lo que estas mediciones de pendientes se las realiza con mayor frecuencia en la fase de reflujo, cercana a la bajamar.

Una vez obtenidas las diferencias entre ambas estacas en cada punto de medición a lo largo de una línea desde la zona de berma hasta la orilla, lo que se hace es crear una tabla con todos esos datos y finalmente aplicar trigonometría. Sabiendo que la distancia horizontal es un valor fijo de 1.52 m, y sabiendo el valor vertical (diferencia entre las estacas) en cada punto, se puede hacer el cálculo de pendiente dividiendo la distancia vertical para la distancia horizontal y de esta forma se obtiene la inclinación de la playa. Además, se acostumbra a presentar un gráfico con los datos obtenidos que muestra el perfil de la playa.

La precisión de los datos obtenidos ha dado resultados muy cercanos a los obtenidos con otros métodos más sofisticados como el método con teodolito; esto se ha podido comprobar en playas como Olón y Punta 7 donde se realizó la toma de datos de los perfiles con ambos métodos como ejercicio en cursos anteriores; en los que se realizó la comparación entre éstos y se pudo concluir que para el fin que se persigue con los datos obtenidos, Emery proporciona resultados confiables.

Cálculo del run-up 2%

El remonte del oleaje conocido también como run-up, se define como la distancia vertical medida con respecto al nivel del mar en reposo que alcanza el oleaje al impactar sobre alguna estructura como se muestra en la ilustración 9.

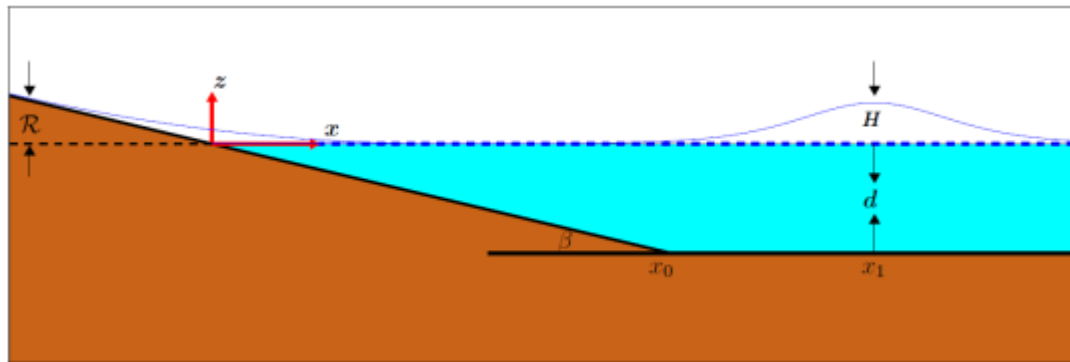


Ilustración 9. Esquema del run-up medido en la playa desde el nivel del mar en reposo. Obtenido de: Fluidsproject. wordpress.

El run-up depende de las condiciones de la playa ya que este fenómeno se produce cuando la ola toca el fondo, se desestabiliza y rompe en la playa provocando el movimiento progresivo del agua sobre la arena; por lo tanto, es importante considerar características de la playa como son: el talud y la existencia de una berma y de su geometría, además de las características del oleaje incidente en la zona de estudio.

Al ser un cálculo muy complejo porque intervienen muchas condiciones que complican el análisis y el desarrollo de un método que acoja todas estas combinaciones, se han propuesto varias ecuaciones para el cálculo del run-up que han salido como resultado de estudios de casos reales y pruebas en laboratorio. El cálculo del run-up se lo ha realizado principalmente para estudios de diseño de estructuras en playas.

Para este cálculo existen algunas formulaciones como por ejemplo: Guzaz y Thornton (1982), Holman (1986), Mase (1989), Nielsen y Hanslow (1991).

En este caso, se toma en cuenta la ecuación propuesta por Holman y Sallenger (1985), ya que es una ecuación que se ajusta a los datos que hemos podido obtener en campo, y comparando con las otras formulaciones, ésta se ajusta al tipo de

playa en estudio; para llegar a la ecuación de Holman y Sallenger (1985), se parte de la ecuación Holman (1986) que es una de una relación del número de Iribarren en aguas profundas medido sobre la línea de costa efectiva sin tomar en cuenta el set up del oleaje, ya que considera que es un estudio que debe evaluarse de forma separada, por lo que la ecuación propuesta por Holman (1986) es:

$$\frac{R_{2\%}}{H_{\infty}} = 0,45 \varepsilon_{\infty}$$

Donde el término $R_{2\%}$ representa el remonte del oleaje excedido un 2%, H_{∞} y ε_{∞} representa la altura significativa y el número de Iribarren en aguas profundas respectivamente. De las pruebas realizadas en laboratorio se obtiene el valor constante de 0,45.

Reemplazando en la ecuación el número de Iribarren en términos de H_{∞} y L_o y aplicando una serie de operaciones, se puede llegar a la siguiente expresión que permite calcular el run-up excedido un 2%:

$$R_{2\%} = 0,18 g^{1/2} \tan \beta H_{\infty}^{1/2} T$$

Donde el run-up queda en términos de la gravedad (g), el ángulo de inclinación de la playa ($\tan \beta$), la altura significativa de la ola en aguas profundas (H_{∞}) y el periodo (T). De esta manera, la ecuación puede ser manejada con los datos que se han obtenido en campo.

El set-up y el run-up representan la elevación total debida al oleaje sobre el nivel del mar determinado por la marea y otros posibles factores que afectan el nivel medio del mar en ese momento. Por lo tanto, la suma de los dos factores representaría la elevación total debida al oleaje como lo muestra la siguiente ecuación:

$$R_{2\%}^t = R_{2\%} + \eta_{max}$$

Donde $R_{2\%}$ representa el run-up y η_{max} la máxima elevación del set-up.

El cálculo de $R_{2\%}^t$ se facilita mediante la relación propuesta por Holman y Sallenger (1985) la cual está representada de la siguiente manera:

$$\frac{R_{2\%}^t}{H_{\infty}} = 0,92\varepsilon_{\infty}$$

Donde la elevación total ($R_{2\%}^t$) queda en términos de H_{∞} y en términos del número de Iribarren en aguas profundas (ε_{∞}) multiplicado por un valor constante de 0,92 que permite que la relación se cumpla.

Además, recordando que el número de Iribarren según el libro Introduction to Coastal Processes and Geomorphology se define como:

$$\varepsilon_{\infty} = \frac{\tan\beta}{\left(\frac{H_{\infty}}{L_{\infty}}\right)^{0,5}}$$

Siendo β el ángulo de la pendiente de la playa y L_{∞} la longitud de la onda en aguas profundas; se puede reemplazar esta expresión en la ecuación para el cálculo de $R_{2\%}^t$ quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$R_{2\%}^t = 0,92 \frac{\tan\beta}{\left(\frac{H_{\infty}}{L_{\infty}}\right)^{0,5}} H_{\infty}$$

En esta ecuación se puede reemplazar L_{∞} recordando que también se puede expresar como $L_{\infty} = \frac{gT^2}{2\pi}$, por lo que luego de varias operaciones algebraicas la ecuación final con la que se va a trabajar en este caso queda como se presenta a continuación:

$$R_{2\%}^t = 0,36g^{1/2}\tan\beta H_{\infty}^{1/2}T$$

Es decir, la ecuación queda en términos de la gravedad (g), el ángulo de inclinación de la playa (β), la altura significativa en aguas profundas (H_{∞}) y el periodo de la ola (T).

La línea de inundación horizontal se calcula desde la zona de rompiente y lo que se hace es una relación trigonométrica entre la pendiente de la playa y la pendiente de la línea de agua máxima que se marca en la arena producto del oleaje.

En la siguiente ilustración se aprecia con mayor detalle la distancia vertical y horizontal que son calculadas para determinar el rebase del olaje y la zona potencial de inundación.

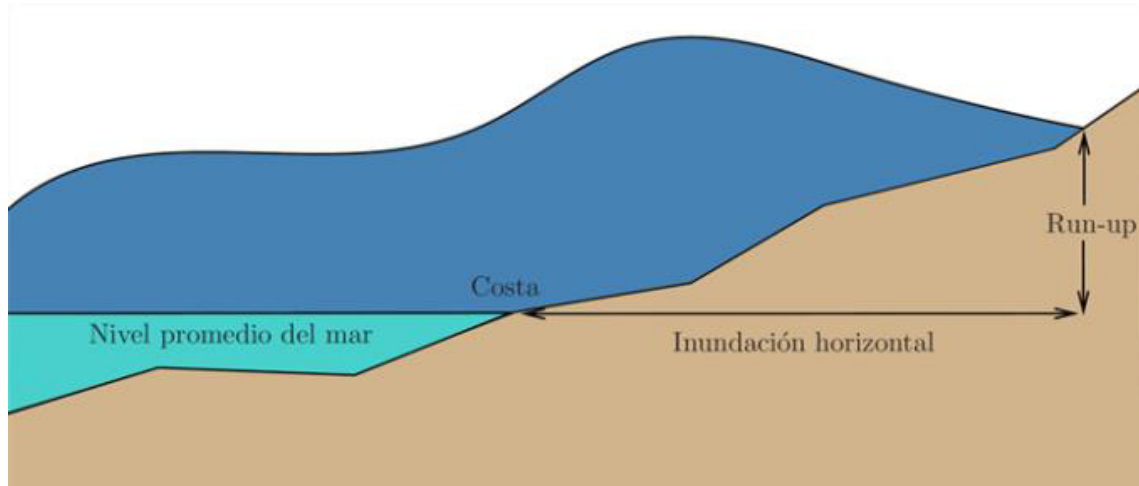


Ilustración 10. Inundación vertical y horizontal en un Tsunami. Obtenido de: [simulador de tsunami. wordpress.](#)

Modelo WAVE WATCH III

Es un modelo que fue desarrollado por el OMB (Ocean Modeling Branch) que a su vez pertenece al NCEP (National Centers for Environmental Prediction).

Es un desarrollo adicional del modelo WAVEWATCH, desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft (Tolman 1989, 1991a) y WAVEWATCH II. WAVEWATCH III, sin embargo, difiere de sus versiones anteriores en muchos puntos importantes, como las ecuaciones gobernantes, la estructura del modelo, los métodos numéricos y las parametrizaciones físicas. Además, esta nueva versión permite un fácil desarrollo de enfoques físicos y numéricos adicionales para el modelado de olas.

WAVEWATCH III resuelve la ecuación de equilibrio de densidad de acción espectral de fase aleatoria para espectros de dirección de número de onda. La suposición implícita de esta ecuación es que las propiedades del medio (profundidad del agua y corriente), así como el propio campo de onda, varían en las escalas de tiempo y espacio que son mucho más grandes que las escalas de variación de una sola onda. Con la versión 3.14 se han incluido algunas opciones

de término fuente para aguas extremadamente poco profundas (zona de surf), así como humedecimiento y secado de los puntos de la grilla. Mientras que la física de la zona de oleajes implementada hasta ahora es todavía bastante rudimentaria, sí implica que el modelo de oleaje ahora se puede aplicar a aguas poco profundas arbitrarias. (National Weather Service, 2008)

El modelo permite introducir los efectos del rozamiento inducido por el fondo además del efecto global de las corrientes, muy importantes en regiones próximas a la costa. El rango de aplicabilidad del modelo permite implementar lo en una amplia variedad de casos de estudio, variando, en cada caso, un conjunto de parámetros que controlan el comportamiento de los términos fuente debidos al viento, y los términos sumidero debidos a la disipación de energía por descrestamiento y rozamiento. Para las interacciones no lineales se optó por una parametrización tipo DIA (Discrete Interaction Aproximation) que libera el modelo de cualquier hipótesis inicial en la forma del espectro y no es tan costosa computacionalmente. (National Weather Service, 2008). Es un conjunto de modelos de ondas que se representa por grillas o redes globales y regionales.

Metodología

El proceso metodológico está conformado en dos partes:

- Descripción del retroceso histórico de la línea de Berma.
- Determinación de la línea de Inundación.

Ambas partes están sujetas a la utilización de softwares como lo son QGIS y RStudio, los cuales permiten un desarrollo práctico y replicable. QGIS corresponde a un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre y puede ser instalado en plataformas de Microsoft Windows, UNIX y GNU/LINUX. RStudio es un programa que integra servicios informáticos para facilitar el desarrollo de códigos de programación basados en informática estadística, es de acceso libre y está disponible para Microsoft Windows. En el proceso metodológico trabajaremos con archivos que ocupan gran memoria, por lo tanto, es importante la utilización de una computadora que tenga capacidad de al menos 16 gb de memoria RAM, esto permitirá un desarrollo metodológico más eficiente.

Es fundamental, antes del desarrollo de la metodología, obtener imágenes históricas referente a el área de estudio. A partir de estas imágenes se puede desarrollar una descripción cualitativa y estadística entre ellas, además de ser fuente de apoyo para establecer líneas de Inundación.

Descripción del Retroceso de la línea de Berma

Obtención de Imágenes Históricas georreferenciadas

El retroceso de la berma natural se describe a partir del análisis de imágenes georreferenciadas históricas para la zona de estudio, además de la imagen georreferenciada actual. Para este caso, las imágenes históricas se obtuvieron mediante la compra al Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), se tuvo a disposición las imágenes de la zona correspondiente a los años 1981, 1995 y 2005; y la correspondiente al 2018 mediante Googlemaps. El IEE facilitó las imágenes georreferenciadas, mientras que la obtenida por medio de Googlemaps se georreferenció mediante el programa QGIS correspondiente a un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Es necesario que las imágenes georreferenciadas tengan el mismo sistema de coordenadas; QGIS permite trabajar en diferentes coordenadas. Para este proyecto se definió cada una de las imágenes en coordenadas geográficas (grados decimales) por preferencia, sin embargo, se puede realizar el procedimiento en coordenadas geográficas, esto queda a elección del usuario. Las imágenes tienen que estar a una escala en la que la zona de estudio sea representada de la mejor manera, para cumplir con esta necesidad, se cortaron las imágenes hasta lograr una representación adecuada de la zona de estudio en los diferentes años disponibles.

Calibración de Imágenes y definición del área de estudio

Las georreferenciaciones en cada una de las imágenes pueden estar sujetas a errores de desfase espacial entre ellas. Evitar este tipo de errores es fundamental, por lo tanto, calibrar las imágenes parte de la identificación de un objeto en común entre ellas para luego superponer cada imagen, teniendo el objeto como base o referencia. La identificación de este objeto es fundamental ya que relaciona las imágenes a través del tiempo y permite que la metodología sea desarrollada, es recomendable la identificación de puntas sobresalientes en la costa o cerros que evidentemente no hayan sufrido cambios en el periodo de tiempo analizado. En Pacoa se logró definir un objeto espacial presente en todas las imágenes y al momento de superponer cada una de ellas se identificó un desfase de milésimas de grados entre las fotos provistas por el IGM y la obtenida de Googlemaps.

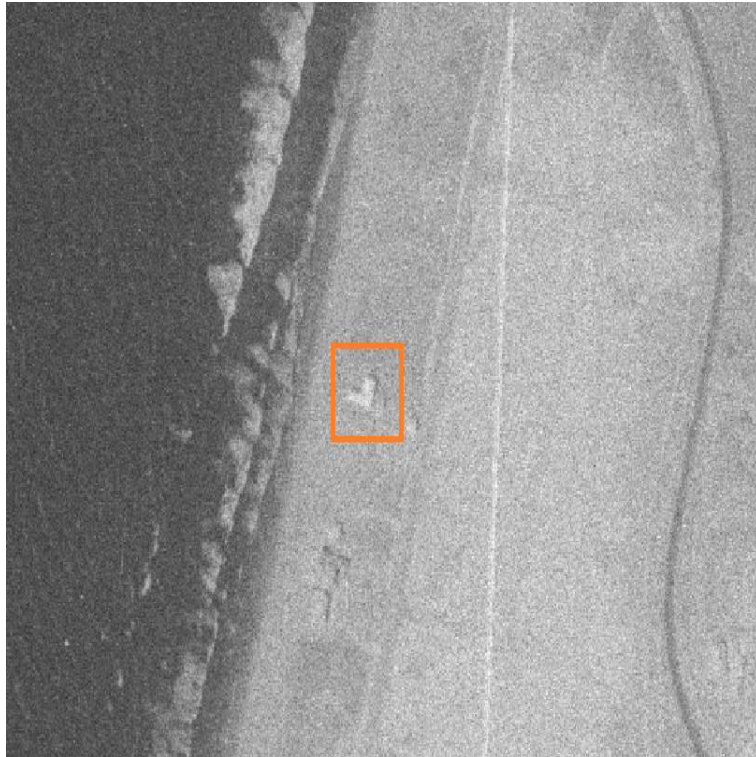


Ilustración 11. Identificación de Objeto espacial para cuadrar la imagen. 1981.



Ilustración 12. Identificación de Objeto espacial para cuadrar la imagen. 1995.



Ilustración 13. Identificación de Objeto espacial para cuadrar la imagen. 2005



Ilustración 14. Identificación de Objeto espacial para cuadrar la imagen. 2018.

Las imágenes a disposición estaban en diferentes escalas, por consecuente se necesitó definir el área de estudio para todas las imágenes. Cada una de las imágenes se cortaron en RStudio a través de la función Crop. Previamente, se requiere de dibujar un polígono en QGIS, el cual cubre el área de estudio. RStudio mediante la función Crop recorta las imágenes a las dimensiones del polígono creado en QGIS. Como resultado tenemos todas las imágenes enfocada en la zona de estudio.

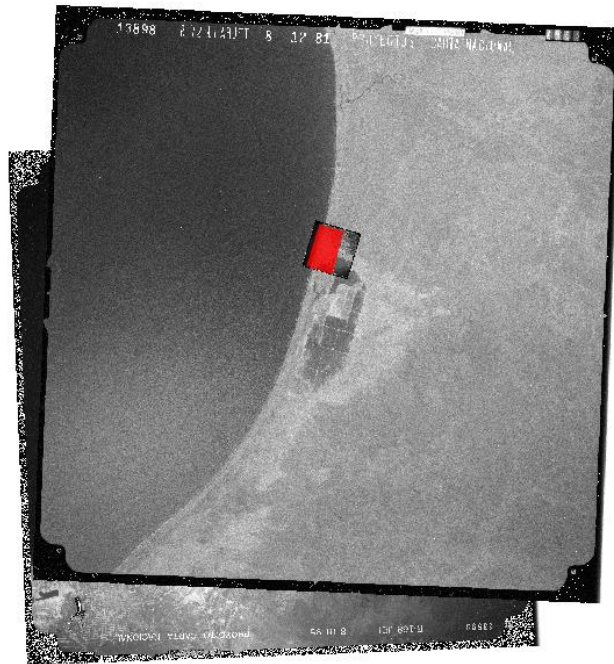


Ilustración 15. Polígono delimitante (Rectángulo rojo). Zona de estudio. Imágenes 1981,1995,2005 superpuestas.

Definición de la línea Base

Con las imágenes calibradas y restringidas a la zona de estudio, se dibuja una línea base en QGIS, esta línea base es determinada mediante la identificación de un área, longitud u objeto que no haya sufrido ningún cambio en el tiempo en que se tienen las imágenes. La definición de la línea base, al igual que la calibración de las imágenes, requiere de la identificación de objetos espaciales que no hayan sufrido cambios en el periodo de tiempo de interés, ya que, a partir de estos objetos espaciales, que sirven como punto de referencia, se realiza el análisis cualitativo y estadístico del retroceso de la línea de berma. La no definición de un punto de referencia representa una limitación del método. Para la zona de estudio se

estableció como línea base el primer camino que esta después de las construcciones más cercanas al mar. Esta línea nos permite tener una referencia fija para la establecer distancias entre la línea en sí y la línea de berma para cada año.



Ilustración 16. Línea base. Fotografía 2018.

Identificación de Línea de Berma para cada año

La exposición de la línea de berma se fijó de manera distinta para cada año. Para la imagen correspondiente a 1981 la identificación de la línea de berma se realizó a partir de información proporcionada por el Ingeniero Richard Flores, del departamento de Riesgo en donde menciona que “estudios realizados por DIRNEA demuestran que la línea de agua en condiciones de Pleamar tenía un alcance de 12 metros a partir del límite del terreno lotizado”. (R. Flores, comunicación personal, 8 de noviembre de 2017). Acogiendo esta información se identificó la construcción más cercana al mar en la imagen y se calculó 12 metros en dirección al mar para fijar así la línea de berma correspondiente a 1981, sin embargo, esta identificación es susceptible al error ya que la información nos indica línea de pleamar, por lo

tanto y debido a la poca información asumimos que la línea de berma esta posteriormente a la línea de agua en pleamar para este año en específico. La fotografía correspondiente al año 1995 se la adquirió en una resolución que no permitió la identificación visual de línea de berma correspondiente a ese año, además no se obtuvo información complementaria para definir la línea de berma como se logró definir para el año 1981. La identificación de la línea de berma para el año 2005 fue relativamente visible debido a la gran resolución de la imagen, se pudo notar la presencia de vegetación y una delimitación bien marcada de la línea de berma. La línea de berma actual se identifica en campo mediante un GPS, en donde se toman puntos de ubicación al límite de la berma. Estos puntos son analizados y procesados en QGIS en donde se los puede unir para obtener la línea de berma. En este proyecto se identificó la línea de berma actual con la metodología expuesta anteriormente, usando un GPS GARMIN Oregon 650 el sábado 18 de noviembre de 2017. Una vez identificada las líneas de berma para cada año, se procede a ser dibujadas en QGIS.

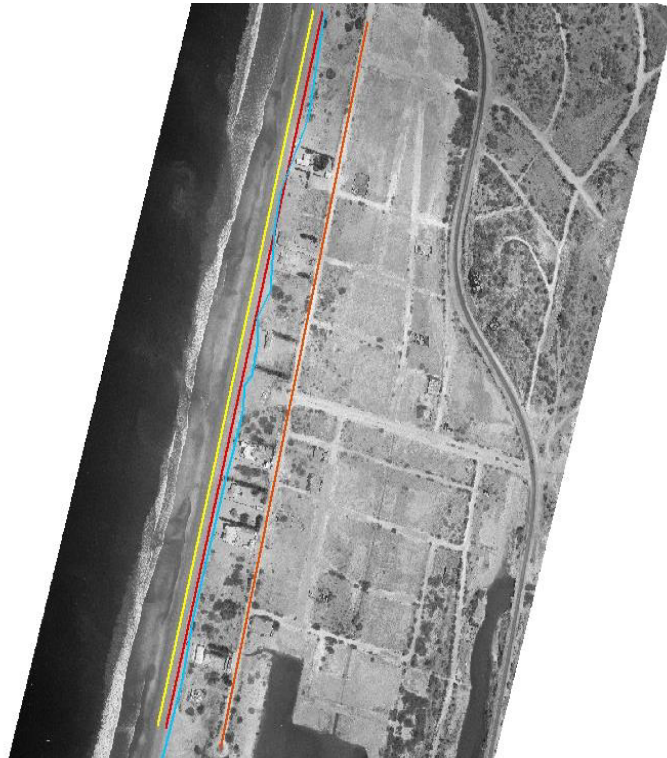


Ilustración 17. Líneas berma y línea base (Naranja). 1981 (Amarilla), 2005 (Rojo), 2018 (Celeste). Foto 2005.

Cálculo de distancia entre línea base y líneas de berma.

La identificación de la línea base y la línea de berma para cada año permite establecer la distancia que existe entre las dos líneas. El cálculo de distancia entre las diferentes líneas de bermas y la línea base se la realiza mediante la función `dist2Line` que utiliza la formula Haversine, esta formulación considera la ubicación (longitud, latitud) entre dos puntos para calcular la distancia entre ellos. El cálculo de distancia entre la línea base y las líneas de berma, requirió la extracción de los puntos que forman la línea base mediante la función `Crop`. Esto se lo ejecutó mediante el corte de la línea base en la imagen georreferenciada del 2005, debido a que esta imagen es la que mejor resolución tiene. Una vez extraído los puntos de la línea base, se utiliza la función `dist2Line` para calcular la distancia entre dichos puntos y las líneas de berma. Debido a que las líneas de berma no conservan equidistancia con la línea base, procedemos a calcular la distancia mínima y promedio entre ellas.

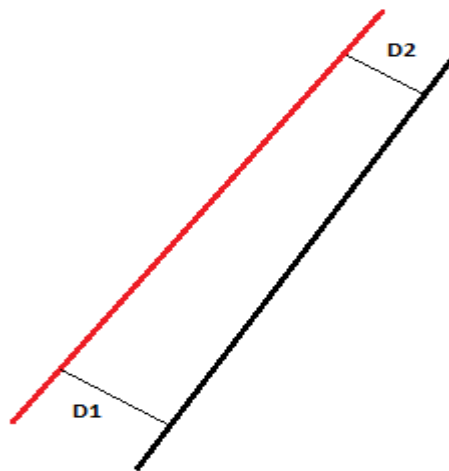


Ilustración 18. $D1 > D2$. Distancia entre líneas

Determinación del retroceso de la línea de berma con respecto a la línea base.

La determinación de distancias entre la línea base y línea de berma, nos permite calcular el proceso erosivo al realizar la diferencia entre las distancias obtenidas en los diferentes años, es posible realizar la operación con la distancia máxima, mínima o promedio mediante las funciones `max`, `min` y `mean` proporcionadas por RStudio. Previamente a la diferencia aritmética entre máximos, mínimos y

promedios, los valores deben estar en forma de matriz para que pueda realizarse la operación de mejor forma. En la ilustración 19 se muestra las diferentes distancias medidas desde la línea base, representada en color negro. Con línea verde se representa la línea de berma para un año en específico y con línea roja la línea de berma para un año posterior.

Todo el procedimiento realizado en RStudio se acopló en un script que se evidencia en el Anexo 1.

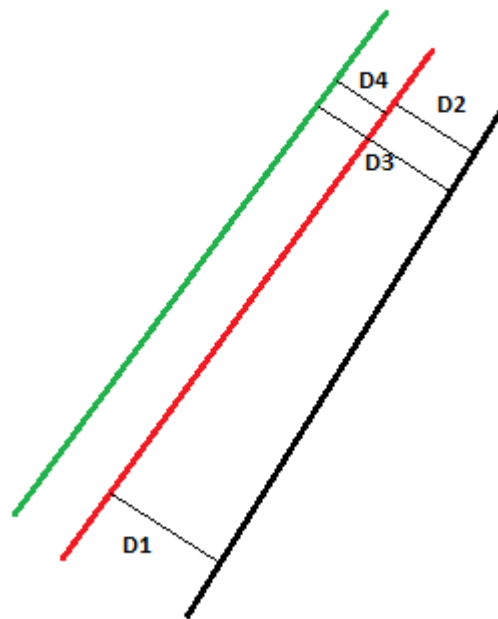


Ilustración 19. $D4 = D3 - D2$. $D4$ interpreta el retroceso de la línea de berma en un tiempo determinado.

Determinación de líneas de Inundación.

Establecer los valores de pendiente de playas.

El valor de pendiente de la playa fue determinado a partir de salidas de campo en condiciones de bajamar en Sicigia aplicando el método Emery en 12 puntos a lo largo de la playa tal como lo muestra la ilustración 20, la cantidad de puntos depende del criterio conservador del encargado de la medición. En cada punto se inicia desde la berma y finaliza cuando la pendiente tome valores cercanos a cero. Finalmente se procesan los datos para determinar la pendiente promedio entre los puntos medidos, percatándose de la existencia de una variabilidad considerable entre ellos, si existiese una variabilidad de pendiente entre los puntos de medición,

se recomienda trabajar por zonas, debido a que el comportamiento del Run-Up es diferente. En la zona de estudio, efectivamente existió una variabilidad en los valores de pendiente, lo que permitió definir 3 zonas conforme a su similitud de valores.



Ilustración 20. Muestreo de Perfiles

Definición de Altura Significativa (H_s) y Periodo Pico (T_p)

Para la identificación del periodo pico y el valor de altura significativa, el cual representa el promedio de 1/3 de las olas más altas registradas en un periodo de tiempo determinado, se utilizó el modelo global de olas WaveWatch III. El paquete de datos que se utilizó fue el del punto de grilla más cercano a la zona de estudio, que cubre toda la provincia de Santa Elena y tiene coordenadas 79° (LON), -2° (LAT) además consta de una resolución espacial de 0.5° . El periodo de tiempo que fue descargado para este análisis va desde enero de 2006 hasta diciembre de 2014, es una recopilación de datos de 9 años que tiene las siguientes variables: tiempo (t_m), periodo pico (T_p), altura significativa (H_s), y dirección pico (D_p).

El valor de la altura significativa de olas en aguas profundas (H_s) es requerido para incorporarlo en la ecuación para el cálculo del Run-up, por lo que se procedió a tomar el valor promedio de la altura significativa del paquete de datos obtenidos directamente de los archivos GRIB2; estos fueron descargados del servidor FTP de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), finalmente fueron almacenados en un archivo MAT para poder procesarlos, obteniendo un valor de altura significativa igual a 1.39 m.

En la ecuación del Run-up también es necesario el valor de período y considerando que el periodo se asume constante en aguas profundas y en aguas someras, el valor del período observado en las salidas de campo fue comparado con el valor promedio del período del paquete de datos de este punto de grilla. Se comprobó que el período para esta zona está alrededor de 14 s, sin embargo, para tener una mayor exactitud, se tomó el valor que arrojó el modelo que fue de 14.05 s.

Cálculo del Run – Up y Alcance Horizontal

Determinar la línea de inundación se fundamenta en el cálculo del Run- Up con excedencia del 2% la cual incluye la elevación del nivel de agua provocada por el set - up, cuya formula, propuesta por Holman y Sallenger (1985) es:

$$R_{2\%}^t = 0.36 * g^{\frac{1}{2}} * \tan \beta * H_{\infty}^{\frac{1}{2}} * T$$

La fórmula consta de términos como H_0 que es la altura de ola en aguas profundas, T que representa el periodo de dicha ola, g es la gravedad, β es el valor de pendiente de la playa y 0.36 es una constante determinada a partir de experimentación desarrollada por dichos autores.

A partir de este valor, que representa la elevación de la línea de agua con respecto al nivel del mar excedido en 2%, y el valor de la pendiente, que representa la inclinación de la playa, se establece el alcance en sentido horizontal del agua a partir de la zona de rompiente promedio mediante una trigonometría básica como se muestra en la ilustración 21, en donde $TAN(\beta) = \frac{Run-Up}{Alcance}$, teniendo en consideración una pendiente constante en sentido perpendicular a la línea de playa y sin la presencia de elementos que interrumpan el libre flujo.

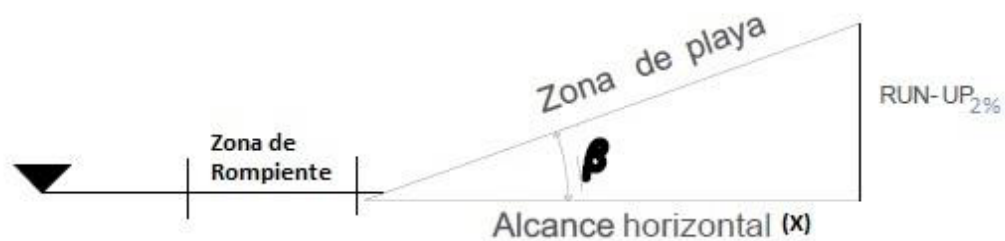


Ilustración 21. Alcance de línea de agua a partir del Run-Up_{2%}

Definición de Escenarios de Inundación

Se tomó a consideración siete escenarios que pueden llegar a generar efectos de inundación en las costas por motivos de incremento de Run-Up. Los escenarios son: aumento del nivel del mar por cambio climático, aumento del nivel del mar por evento El Niño, oleajes de tormentas, a partir de estos tres escenarios se consideró la posibilidad de que se presente una superposición de los mismos, por lo tanto se analizó escenarios de evento El Niño más aumento del nivel del mar, evento El Niño más oleaje de tormenta, así como también el escenario de aumento de nivel del mar más oleaje de tormenta y por último el escenario que representa la máxima amenaza, evento El Niño más aumento de nivel del mar y oleaje de tormenta. El valor establecido para el aumento del nivel del mar fue el determinado por el tercer informe de evaluación del IPCC el cual establece un valor entre 30 y 50 cm de aumento del nivel del mar desde 1990 al 2100 (UNESCO/COI, 2010). El oleaje de tormenta se consideró el descrito en la tesis de grado de la máster Gina Andrade, el cual dice que el 6 de enero de 1978 se produjo una tormenta en el área 30°N – 140°O, la cual generó un oleaje con un ángulo de aproximación de 290° presentando olas de 2 m en aguas profundas con un período de 18 segundos (Andrade García, Bravo Mosquera, Noboa Moreira, & Santos Pablo, 1992). Para determinar el valor del aumento del nivel del agua producido por el evento El Niño, se sabe que genera asensos superiores a 40 cm sobre su promedio histórico, como se registró en El Niño de los años 1982-1983 (Sánchez Cuadros, 2003).

Cálculo de Líneas de Inundación

Para establecer diferencias en el alcance de la línea de inundación en los diversos escenarios, es necesario fijar un nivel de referencia, lo que permite determinar, a

partir de este punto, cuanto aumenta el alcance de la línea de agua en las diferentes situaciones propuestas. El nivel de referencia se encuentra mediante la definición de línea de agua promedio en pleamar en condiciones de Sicigia, la cual se identificó de la misma manera que se asentó la línea de berma para el año 2017. Los puntos se tomaron el sábado 18 de noviembre del 2017 en donde según la tabla de mareas correspondiente a Monteverde existió una altura de marea de 2.2 metros, la cual representa la sexta más alta en el respectivo año. Esta línea de agua tiene un alcance (X_1) como consecuencia del Run- Up en ese momento, por lo tanto, un Run- Up de más magnitud tendrá un alcance mayor al de la línea de referencia, respetando siempre las consideraciones que indican una pendiente constante en sentido perpendicular a la línea de playa y sin la presencia de elementos que interrumpan el libre flujo.

Es práctico usar la línea de berma como punto de origen de las inundaciones ($I=0$), ya que en esta zona se concentra mucha actividad antropogénica. Por consiguiente se mide la distancia entre la línea de referencia y la línea de berma, esta distancia (L) nos permite calcular el alcance de inundación (I) a partir de la berma una vez que se ejecute la diferencia entre el alcance en los diferentes escenarios (X_n) y la suma entre la distancia de la línea de referencia (X_1) y la distancia L . Para un mejor entendimiento, nos apoyamos en la ilustración 22 la cual nos permite llegar a la siguiente fórmula:

$$I = X_n - (X_1 + L)$$

En donde:

I : Inundación desde la línea de berma.

X_n : Alcance horizontal de la línea de agua en cualquier escenario oceánico propuesto.

X_1 : Alcance horizontal de la línea de agua para condiciones de pleamar en Sicigia.

L : Distancia entre la línea de berma y la línea de agua para condiciones de pleamar en Sicigia.

La distancia L (distancia entre la línea de agua promedio en pleamar y la línea de berma) se midió en los mismos puntos donde se midieron las pendientes y su valor fue de 3.4 metros en promedio.

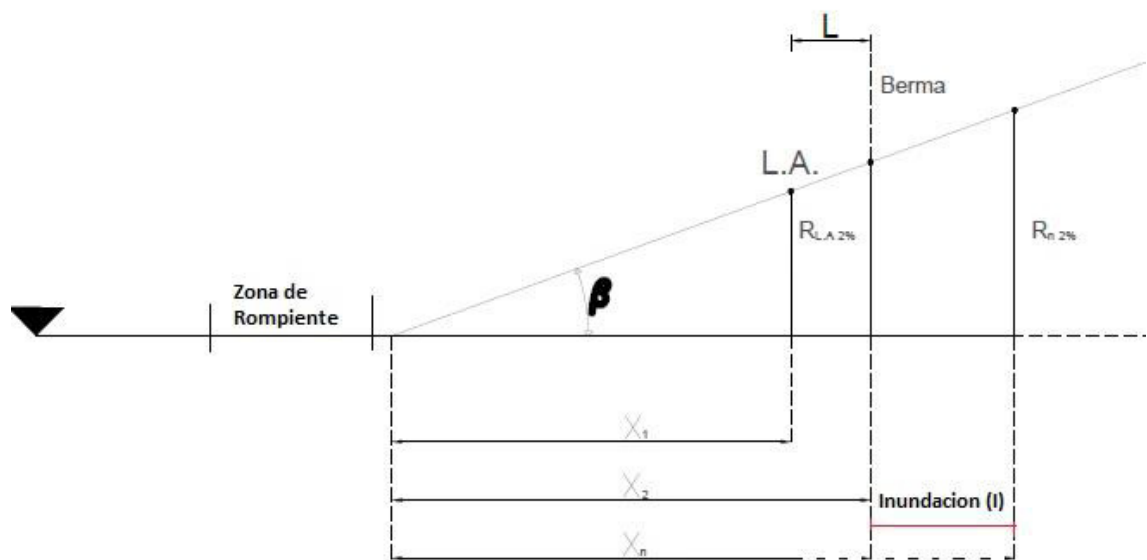


Ilustración 22. Diagrama de Alcances Horizontales a partir del Run-Up 2%.

Se tiene que tomar en consideración que, las construcciones sobre la zona de berma crean una irregularidad en la berma natural de la playa, por lo que es necesario proyectar la berma “natural” en donde existe este tipo de invasiones. A partir de esta proyección, si es requerida, se calcula la inundación (I). Tomamos en consideración la berma medida en la zona 1 para proyectarla en parte de la zona 2 y 3 en donde existe obras de protección en la extensión de playa. A partir de esa proyección se calculó la inundación en estos sectores.

Resultados

En base a la metodología desarrollada se obtuvieron los siguientes resultados correspondiente a el retroceso histórico de la línea de berma y líneas de inundación.

Retroceso de Berma

Los resultados correspondientes al retroceso de la línea de berma están en un periodo de tiempo desde 1981 al 2018. Se muestran principalmente, en un diagrama BoxPlot, las distancias entre la línea base y línea de berma en los años correspondientes a las fotos que se utilizaron para el proyecto como se observa en la ilustración 23. El primer bloque corresponde a la distancia en 1981, el segundo en 2005 y el tercero la distancia a inicios de 2018. Es evidente que con el paso de los años, la distancia que se ha ido acortando, ya que para 1981 el valor máximo entre la línea base y la berma fue aproximadamente 100 metros, para 2005 llegó aproximadamente a 85 metros y finalmente para inicios de 2018, el valor máximo no alcanzó los 80 metros.

En la tabla 1 se muestran los valores promedio de las distancias obtenidas luego del análisis estadístico. La tabla se interpreta como la distancia entre las bermas de 1981 y 2005 fue de 12.01 metros; entre las bermas de 2005 y 2018 hubo una diferencia de 7.66 metros y haciendo el análisis entre las bermas de 1981 y 2018 se obtuvo 19.67 metros de diferencia.

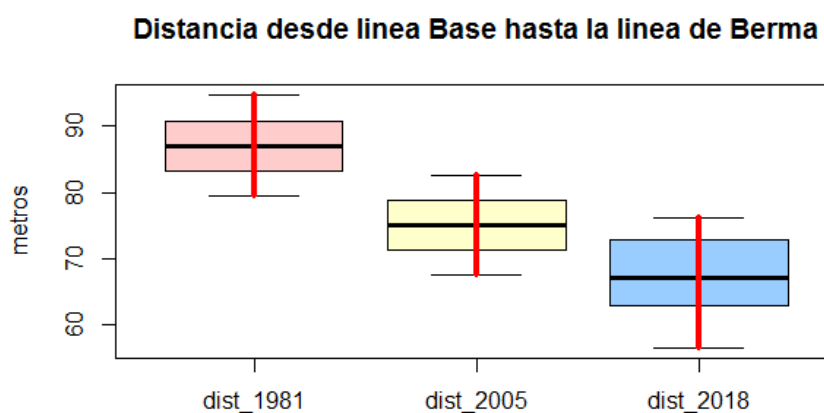


Ilustración 23. Boxplot representativo a los datos de distancias entre línea base y línea de berma para los diferentes años.

Retroceso de Berma.	
Periodo	Distancia Promedio (m)
1981-2005	12.01
2005-2018	7.66
1981-2018	19.67

Tabla 1. Retroceso de la línea de berma en diferentes periodos

Determinación de líneas de Inundación

El proceso de determinar líneas de inundación muestra resultados correspondientes a valores de pendiente de la playa y a valores de distancia entre la línea de berma y línea de inundación.

Se diferenció variabilidad de pendientes, las cuales se establecieron en tres zonas conforme a su similitud de valores como lo establece la tabla 2:

Zonas	Pendiente	Distancia Longitudinal (m)
Zona 1	0.074	189
Zona 2	0.033	471
Zona 3	0.066	410

Tabla 2. Valor de pendiente y distancia longitudinal de las zonas identificadas.

Para una mejor apreciación se presentan las zonas de forma gráfica superpuestas a la zona de estudio



Ilustración 24. Zonificación de acuerdo con similitud de pendientes en la zona de estudio.

Tomando como punto de origen la línea de berma se presentan los valores de distancia, correspondientes a la línea de inundación, en la tabla 3.

La interpretación grafica de las líneas de inundación conforme a las distancias establecidas se presentan zonalmente en diferentes escalas 1:750, 1:1.675, 1:1.526 para la zona 1, zona 2 y zona 3 respectivamente. Asimismo, se presenta el mapa general de la zona de estudio en una escala de 1:4.164. Además, se muestra la línea de agua en pleamar en condiciones de sicigia.

Inundación en diferentes escenarios (A-G)							
Zonas	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)	E (m)	F (m)	G (m)
1	6.69	0.65	10.75	2.01	6.06	12.10	16.15
2	6.69	5.69	15.78	8.72	17.81	18.81	27.90
3	6.69	1.15	11.24	2.66	7.21	12.75	17.30

Tabla 3. Valores de distancia por zonas, entre la línea de Berma y línea de inundación en los diferentes escenarios en condiciones de Pleamar en Sicigia. (A) Debido a oleaje de tormenta, (B) Debido a variación en el nivel del mar por cambio climático, (C) Debido a variación en el nivel del mar por cambio climático y oleaje de tormenta, (D) Debido al aumento del nivel del mar por evento El Niño en condiciones de Sicigia, (E) Debido al aumento del nivel del mar por evento El Niño y aumento del nivel del mar por cambio climático, (F) Debido al aumento del nivel del mar por evento El Niño y oleaje de tormenta, (G) Debido al aumento del nivel del mar por evento El Niño, aumento del nivel del mar por cambio climático y oleaje de tormenta.



Ilustración 25. Alcance debido a oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 1.



Ilustración 26. Alcance debido el aumento del nivel del mar en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 1.



Ilustración 27. Alcance debido el aumento del nivel del mar y oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 1.



Ilustración 28. Alcance debido el evento El Niño condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 1.



Ilustración 31. Alcance debido el evento El Niño, aumento de nivel del mar y oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 1.



Ilustración 32. Alcance en los diversos escenarios en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 1.



Ilustración 33. Alcance debido a oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 2.



Ilustración 34. Alcance debido al aumento del nivel del mar en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 2.



Ilustración 35. Alcance debido al aumento del nivel del mar y oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 2.



Ilustración 36. Alcance debido al evento El Niño en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 2.



Ilustración 37. Alcance debido a el evento El Niño y aumento del nivel del mar en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 2.



Ilustración 38. Alcance debido al evento El Niño y oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 2



Ilustración 39. Alcance debido al evento El Niño, aumento del nivel del mar y oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 2.



Ilustración 40. Alcance en los diversos escenarios, en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 2.



Ilustración 41 Alcance debido a oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 3.



Ilustración 42. Alcance debido a aumento del nivel del mar en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 3



Ilustración 43. Alcance debido al aumento del nivel del mar y oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 3.



Ilustración 44. Alcance debido al evento El Niño en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 3.



Ilustración 45. Alcance debido al evento El Niño y aumento del nivel del mar en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 3.



Ilustración 46. Alcance debido al evento El Niño y oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 3.



Ilustración 47. Alcance debido al evento El Niño, aumento del nivel del mar y oleaje de tormenta en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 3.



Ilustración 48. Alcance en los diversos escenarios, en condiciones de pleamar en sicigia. Distancia entre Berma y línea de Inundación. Zona 3.

Análisis de Resultados

Para el análisis de resultados es importante recordar que debido a la poca resolución de la imagen correspondiente al año 1995, esta no fue considerada para el proceso metodológico de retroceso de línea de berma. Con ayuda de la ilustración 23, podemos notar un descenso en los valores pertenecientes a las distancias entre las bermas desde el año 1981 hasta el año 2018. Debido a que las líneas no se conservan paralelas entre sí a lo largo de la zona de estudio, la representación Boxplot nos permite visualizar los valores mínimos, promedios y máximos de distancia entre la línea de berma y línea base. El valor mínimo de distancia entre la línea base y su respectiva línea de berma para los años 1981, 2005 y 2018 tienen un valor de 79.47, 67.45, 56.55 metros respectivamente. De igual manera podemos notar los valores promedios de 86.98, 74.97, 67.31 metros para los años 1981, 2005 y 2018 correspondientemente. A partir de estos valores se puede representar cuanto es el retroceso de berma entre dos años en específico. El retroceso de la línea de berma desde 1981 hasta 2018 es notorio en los diferentes periodos de tiempo establecidos. Entre 1981 - 2005 existe un retroceso de 4.35 metros con respecto al periodo 2005 – 2018. Desde 1981 a la actualidad la línea de berma ha retrocedido 19.67 metros. Cabe mencionar, dentro de la interpretación de resultados, que durante todo el periodo de análisis han existidos eventos El Niño muy fuertes como fue en el periodo 1982 – 1983 y 1997 – 1998 que pudieran haber tenido un efecto erosivo mayor sobre la línea de berma, en base a esto es inadecuado mantener un supuesto de erosión anual constante. Sin embargo, durante el periodo 2005 – 2018 no hay registro de un evento El Niño con características similares a las del periodo 1982 – 1983 y 1997 – 1998, por consecuente se puede asumir el supuesto de una erosión anual constante la cual corresponde a un valor de 0.589 m durante este periodo.

La Zona 2 corresponde a la zona con menor pendiente con un valor de 0,033, lo que favorece el avance de la línea de inundación, corresponde también a la zona en donde se encuentran más residencias además de obras de protección frente al oleaje. En la zona 1 no hay presencia de residencias y es la que presenta mayor pendiente con un valor igual a 0,074, lo que indica un menor alcance en la línea de inundación. La zona 3 consta de una pendiente intermedia igual a 0,066,

correspondiente al doble de la zona 2, es importante mencionar la existencia de obras de protección en las residencias de dicha zona.

Las diferentes líneas de inundación están sujetas exclusivamente a la pendiente correspondiente a cada zona, como lo muestra la tabla 2, ya que las condiciones oceanográficas de cada escenario son las mismas para toda playa.

La tabla 3 nos muestra que el escenario correspondiente a oleaje de tormenta representaría un alcance de línea de agua igual a 6.69 m para todas las zonas, sin una diferenciación debido a la pendiente, además es el escenario que tiene mayor alcance sin la superposición de los demás escenarios, a excepción del alcance debido al evento El Niño en la zona 2, el cual corresponde a una distancia de 8.72 m. En los escenarios oceanográficos remanentes se refleja una clara diferencia en el alcance de la inundación por parte de las zonas 1 y 3 con respecto a la zona 2, la cual tiene un alcance mayor debido a su bajo valor de pendiente con respecto a las otras 2 zonas. Existe un promedio de 0.75 m de diferencia en la distancia de la línea de inundación entre la zona 1 y 3. La diferencia en el alcance de inundación entre la zona 1 y la zona 2 es 7.83 m en promedio, siendo los valores más altos correspondiente al escenario de inundación debido al evento El Niño y aumento del nivel del mar por cambio climático (11.75 m), y al escenario extremo, el cual corresponde a la superposición de el evento El Niño, aumento del nivel del mar por cambio climático y oleaje de tormenta (11.75 m). Entre las zonas 2 y 3, existe una diferencia promedio igual a 7.06 m, presentando su diferencia más elevada correspondiente a 10.60 m, en los escenarios de inundación debido al evento El Niño y aumento del nivel del mar por cambio climático, y en el escenario extremo, correspondiente a el evento El Niño, aumento del nivel del mar por cambio climático y oleaje de tormenta.

Debido a la presencia de obras de protección sobre la zona de berma, se calculó el alcance de inundación en partes de la zona 2 y zona 3 a partir de la proyección de la línea de berma correspondiente a la zona 1, esta proyección se da debido a que estas construcciones crean una línea de berma irregular. La representación en los gráficos de la línea de agua correspondiente a pleamar en sicigia es importante para poder interpretar lo cerca que se encuentra actualmente dicha línea de agua de la línea de berma, 3.4 metros en promedio, y lo aproximado que se encuentra el escenario actual con respecto a los escenarios dispuestos. Asimismo, permite tener

una consideración del riesgo a que enfrentan las personas que están asentadas en esta zona.

Conclusiones

- La playa Pacoa se encuentra en un periodo erosivo desde el año 1981 a la actualidad.
- El retroceso de línea de berma desde 1981 a la actualidad es evidente en toda la longitud de la zona de estudio, teniendo en promedio un retroceso de 19.67 metros.
- La identificación de la línea de berma para cada año está sujeta a errores si no se tiene una información válida que permita asegurar la posición de la berma en determinado tiempo. Monitorear en campo periódicamente la ubicación de esta línea evita la especulación de errores, obteniendo resultados con más precisión.
- En el periodo de 1981 – 2005 se presenta un retroceso mayor al establecido en el periodo 2005 – 2018, lo que puede ser consecuente a la presencia de 2 fenómenos El Niño muy fuertes, como lo fue el del periodo 1982 – 1983 y 1997 – 1998. La presencia de estos dos eventos naturales dentro de este periodo impide establecer una estimación de la tasa anual de retroceso para la playa Pacoa.
- El análisis no se pudo seccionar en rangos de tiempos más pequeños debido a la poca información bibliográfica y a la adquisición de imágenes con poca resolución para esta zona.
- Todas las situaciones oceanográficas establecidas superan el nivel de berma actual. El alcance mínimo que corresponde a la presencia de un aumento de nivel del mar en 0.3 metros, supera la línea de berma en 0.65 metros en la zona 1. El alcance máximo se da en la superposición entre los escenarios aumento nivel del mar, evento El Niño y oleaje de tormenta el cual superan la línea de berma en 27.90 metros en la zona 2.
- El alcance calculado es directamente proporcional a la pendiente de la playa, por tal razón, la zona 2, con pendiente igual a 0.033 es la más sensible a inundaciones. La zona 1 sin embargo, con una pendiente mayor al doble de la pendiente en la zona 2, es la zona en donde el escenario máximo (Aumento del nivel del mar, evento El Niño y oleaje de tormenta) tiene un alcance igual a 16.15 metros a partir de la berma actual, lo cual representa 11.75 metros menos que el efecto de inundación para el escenario máximo en la zona dos.
- Las residencias establecidas en la playa de Pacoa están ante la constante amenaza que representa el océano y su variabilidad, por lo cual se deben tomar medidas de precaución al respecto para salvaguardar el patrimonio.

Recomendaciones

- El estudio de dinámica costera es importante para disminuir el riesgo de inundaciones en el borde costero a causa de cambios oceanográficos. Por tal motivo las autoridades municipales competentes deben tener un plan de estudio y monitoreo de sus costas.
- Monitorear las playas es una sugerencia que se debe tomar muy en cuenta, ya que nos permite tener una mayor cantidad de información y por consecuente un procesamiento y análisis de resultados más detallado y preciso.
- La metodología presentada para la determinación de líneas de inundación está sujeta a modificaciones que ayuden a mejorar la interpretación de resultados. En este caso en específico se consideró que no existe barrera que interrumpa el flujo libre de agua, sin embargo, es importante incluir un tratamiento especial a esta condición.
- Para el estudio de retroceso de línea de berma se usaron 4 imágenes, de las cuales 3 son históricas, esto limitó el análisis en periodos de tiempo más cortos. La toma de ortofotografías semestrales para un mismo periodo de tiempo (época seca y época húmeda) y condiciones oceanográficas (sicigia y cuadratura), nos ayuda a monitorear de una mejor manera el comportamiento dinámico de la zona costera, esta acción facilitaría estudios que contribuyen a la disminución de riesgos en el borde costero.
- Se recomienda a las autoridades municipales la implementación de tecnologías relativas a captura fotográficas en diferentes ángulos y con sensores que capten diferentes espectros de energía para de esta forma facilitar la obtención de datos.
- Se sugiere tomar medidas de prevención en la limitación de construcciones futuras permanentes en la playa de Pacoa, dando relevancia a la zona 1, que representa la zona en donde aún se conserva la naturalidad de la playa.
- Socializar el presente estudio con los residentes y dueños de terrenos en la playa de Pacoa, para que de esta manera tengan conocimiento del proceso erosivo que ha tenido la playa y el riesgo de inundación al que están propensos.
- Para tener un apoyo técnico en la toma de decisiones frente a la gestión de recursos y disminución de riesgos en la costa, es fundamental que los municipios costeros tengan personal capacitado en temas oceanográficos.
- Se recomienda la presencia de un equipo de trabajo con aptitudes en el manejo de Sistemas de Información Geográficas (SIG) y en software como RStudio, QGIS y Excel para desarrollar la metodología propuesta de forma más eficiente.

Referencias

- Andrade García, G. M., Bravo Mosquera, F., Noboa Moreira, R., & Santos Pablo, E. (1992). Soluciones ingenieriles a los problemas erosivos de La Libertad. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Osorio, A. F., & Da Fontoura Klein, A. H. (Octubre de 2014). *Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America*.
- COA. (2017). *CODIGO ORGANICO DEL AMBIENTE*. Quito.
- Dally, W. R. (s.f.). *Surf Zone Process*.
- DAVIDSON-ARNOTT, R. (s.f.). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*.
- Díaz, A. I. (2012). *Calculadora geoespacial*. Obtenido de Facultad de Informática de la Universidad de la Plata: http://41jaiio.sadio.org.ar/sites/default/files/41_EST_2012.pdf
- Doody, P., Ferreira, M., Lombardo, S., Lucius, I., Misdorp, R., Niesing, H., . . . Pérez, C. (2005). *EUROSIÓN*. Obtenido de VIVIR CON EROSIÓN COSTERA EN EUROPA: http://www.euroasion.org/project/euroasion_es.pdf
- DWIGHT A. WEBSTER. (s.f.). A Simple Method of Measuring Beach Profiles.
- Escobar S., C. A. (2011). *RELEVANCIA DE PROCESOS COSTEROS EN LA HIDRODINÁMICA DEL GOLFO DE URABÁ (CARIBE COLOMBIANO)*.
- Fidalgo, E. (28 de Octubre de 2013). *FORMACIÓN DE COSTAS - PROCESOS COSTEROS*.
- Flores, R. (8 de Noviembre de 2017). Problemática en Pacoa. (D. A. Guevara Marquez, Entrevistador)
- Gobierno de Ecuador. (2017). *PLAN NACIONAL DEL BUEN VIVIR*. Quito.
- Gobierno de España. (2017). *Ley de Costas para la protección ambiental y el desarrollo sostenible de nuestro litoral*. Obtenido de <http://www.mapama.gob.es/es/costas/temas/modificacion-ley-costas/objetivos-contenido-reforma/ley-costas-objetivos.aspx>
- Jongejan, R., Ranasinghe, R., Wainwright, D., Callaghan, D. P., & Reyns, J. (30 de Enero de 2016). Ocean & Coastal Management Drawing the line on coastline recession risk. *Ocean and Coastal Management*.
- Lemay, M. H. (1998). *Manejo de los recursos costeros y marinos en America Latina y El Caribe*. Washington.
- Lemus, J. (2014). *ANÁLISIS ESPACIAL PARA EL ORDENAMIENTO DE LA ZONA COSTERA DEL GOLFO DE CARIACO, ESTADOS UNIDOS VENEZUELA*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/721/72132516004/>
- Macas, F. (18 de Abril de 2010). *Jambelí pierde playa y turistas por oleajes y falta de prevención*. Obtenido de El Universo: <https://www.eluniverso.com/2010/04/18/1/1447/jambeli-pierde-playa-turistas-oleajes-falta-prevencion.html>

- National Geographic. (2010). *El aumento del nivel del mar*. Obtenido de Medio ambiente: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/el-aumento-del-nivel-del-mar>
- National Weather Service. (5 de Noviembre de 2008). NOAA. Obtenido de Modelo Wavewatch III: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>
- Pinto U., E. (2016). *El Niño, La Niña, ENSO, ENOS, El Niño Modoki, El Niño Canónico, El Niño Extraordinario, El Niño Godzilla, El Niño Costero, El Niño Oriental ¿En qué consisten realmente y cómo afectan al Ecuador?* Obtenido de INOCAR: <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/articulos/770-el-nino-la-nina-enso-enos-el-nino-modoki-el-nino-canonical-el-nino-extraordinario-el-nino-godzilla-el-nino-costero-el-nino-oriental-en-que-consisten-realmente-y-como-afectan-al-ecuador>
- Red Atlántica para la Gestión de los Riesgos Costeros. (2017). *Soluciones alternativas para la protección de las costas*. Obtenido de https://corimat.net/wp-content/uploads/2017/03/2_Outil2_56P_ES.pdf
- Sánchez Cuadros, E. (2003). "DISEÑO DE LAS OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA DEL MALECON DE LA LIBERTAD, PROVINCIA DEL GUAYAS. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- UNESCO/COI. (2010). AUMENTO Y VARIABILIDAD DEL NIVEL DEL MAR- RESUMEN PARA RESPONSABLES DE POLÍTICAS. Francia.
- Universitat Politècnica de Catalunya. (2018). Capítol 2. En Rebase del oleaje. Definición del problema a estud, *Rotura del oleaje* (págs. 4-21). Catalunya.
- Universitat Politècnica de Catalunya. (s.f.). Capítol 2. En Rebase del oleaje. Definición del problema a estud, *Rotura del oleaje* (págs. 4-21). Catalunya.

ANEXO 1

#Se descargan las librerías que contienen las funciones a usarse.

```
library(sp)
```

```
library(raster)
```

```
library(rgdal)
```

```
library(geosphere)
```

```
library(maptools)
```

```
library(ggmap)
```

#Cuadrar las imágenes con el basemap de QGIS

```
setwd ("C:/Users/USER/Desktop/Proyecto Olas_final/Imagenes proyectadas")
```

```
A2005=raster('2005_longlat.tif')
```

```
A2005[A2005==0]=NA#elimino los 0 por valores vacíos para aligerar el peso
```

```
extent(A2005) =extent(-80.7428,-80.72892,-2.080797,-2.066832)#extent original
```

```
extent(A2005)=extent(-80.7428-0.00006,-80.72892-0.00006,-2.080797+0.00005,-  
2.066832+0.00005)#extent cuadrado
```

```
writeRaster(x=A2005,filename="C:/Users/gabriel/Documents/Proyecto
```

```
Olas/Imagenes
```

```
Cuadradas/2005_cuadrada",format="GTiff",options="INTERLEAVE=BAND",overw  
rite=TRUE)
```

```
A1981=raster('1981_longlat.tif')
```

```
A1981[A1981==0]=NA#elimino los 0 por valores vacios para aligerar el peso
```

```
extent(A1981)=extent(-80.80587,-80.66557,-2.157253 ,-2.016108)#extent original
```

```
extent(A1981)=extent(-80.80587-0.000045,-80.66557-0.000045,-  
2.157253+0.00014,-2.016108+0.00014)#extent cuadrado
```

```
writeRaster(x=A1981,filename="C:/Users/gabriel/Documents/Proyecto
```

```
Olas/Imagenes
```

```
Cuadradas/1981_cuadrada",format="GTiff",options="INTERLEAVE=BAND",overw  
rite=TRUE)
```

```
A1995=raster('1995_longlat.tif')
```

```

A1995[A1995==0]=NA (elimino los 0 por valores vacíos para aligerar el peso)
extent(A1995)=extent(-80.80685,-80.68205,-2.179071,-2.053522)#extent original
extent(A1995)=extent(-80.80685-0.00485,-80.68205-0.00485,-
2.179071+0.00762,-2.053522+0.00762)#extent cuadrado
writeRaster(x=A1995,filename="C:/Users/gabriel/Documents/Proyecto
Olas/Imagenes
Cuadradas/1995_cuadrada",format="GTiff",options="INTERLEAVE=BAND",overw
rite=TRUE)

```

#Cortar las imágenes con un polígono creado en QGIS.

```

setwd("C:/Users/USER/Desktop/Proyecto Olas_final/Imagenes Cuadradas/")
A2005=raster("2005_cuadrada.tif")
A1995=raster("1995_cuadrada.tif")
A1981=raster("1981_cuadrada.tif")
corte=readShapeSpatial("C:/Users/gabriel/Documents/Proyecto
Olas/Analisis/corte.shp")
proj4string(corte)=CRS("+proj=longlat +datum=WGS84 +ellps=WGS84
+towgs84=0,0,0")
A2005=mask(crop(A2005,corte),corte)
A1995=mask(crop(A1995,corte),corte)
A1981=mask(crop(A1981,corte),corte)

sbbox <- make_bbox(lon =c(-80.7428,-80.72892) , lat =c(-2.080797,-2.066832) , f =
.1)
sq_map <- get_map(location = sbbox, maptype = "satellite", source = "google")

str(sq_map)
mgmap <- as.matrix(sq_map)
vgmap <- as.vector(mgmap)
vgmaprgb <- col2rgb(vgmap)
gmapr <- matrix(vgmaprgb[1, ], ncol = ncol(mgmap), nrow = nrow(mgmap))
gmapg <- matrix(vgmaprgb[2, ], ncol = ncol(mgmap), nrow = nrow(mgmap))
gmapb <- matrix(vgmaprgb[3, ], ncol = ncol(mgmap), nrow = nrow(mgmap))

```

```

rgmaprgb <- brick(raster(gmapr), raster(gmapg), raster(gmapb))
extent(rgmaprgb) <- unlist(attr(sq_map, which = "bb"))[c(2, 4, 1, 3)]
rm(gmapr, gmapg, gmapb,sq_map,sbbox)
projection(rgmaprgb) <- CRS("+init=epsg:4326")
plotRGB(rgmaprgb)

```

```

A2018=mask(crop(rgmaprgb,corte),corte)

```

```

writeRaster(x=A2005,filename="C:/Users/gabriel/Documents/Proyecto
Olas/Imagenes
cortadas/2005_corte",format="GTiff",options="INTERLEAVE=BAND",overwrite=T
RUE)
writeRaster(x=A1995,filename="C:/Users/gabriel/Documents/Proyecto
Olas/Imagenes
cortadas/1995_corte",format="GTiff",options="INTERLEAVE=BAND",overwrite=T
RUE)
writeRaster(x=A1981,filename="C:/Users/gabriel/Documents/Proyecto
Olas/Imagenes
cortadas/1981_corte",format="GTiff",options="INTERLEAVE=BAND",overwrite=T
RUE)
writeRaster(x=A2018,filename="C:/Users/gabriel/Documents/Proyecto
Olas/Imagenes
cortadas/2018_corte",format="GTiff",options="INTERLEAVE=BAND",overwrite=T
RUE)

```

#En QGIS se dibujan las bermas para cada año.

#Se obtienen las estadísticas descriptivas.

```

setwd("C:/Users/USER/Desktop/Proyecto Olas_final/Imagenes cortadas)

```

```

A2005=raster("C:/Users/gabriel/Documents/Proyecto Olas/Imagenes
cortadas/2005_corte.tif")

```

```

setwd("C:/Users/USER/Desktop/Proyecto Olas_final/Imagenes cortadas")
L1981=readOGR(dsn = ".", layer = "Berma_1981")
L2005=readOGR(dsn = ".", layer = "Berma_2005")
L2018=readOGR(dsn = ".", layer = "Berma_2017")
L2018=spTransform(L2018,CRS=CRS("+proj=longlat          +datum=WGS84
+ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0"))
Lbase=readOGR(dsn = ".", layer = "Linea_Base")

```

#Se extraen los puntos de la línea base en la imagen georreferenciada del 2005.

```

puntos=mask(crop(A2005,Lbase),Lbase)
plot(puntos,col=rainbow(10))
Pbase=data.frame(rasterToPoints(puntos))
coordinates(Pbase)=c("x","y")
proj4string(Pbase)=CRS("+proj=longlat          +datum=WGS84          +ellps=WGS84
+towgs84=0,0,0")

```

#Se calculan las distancias.

```

D1981=dist2Line(Pbase,L1981,distfun = distHaversine)[,1]
D2005=dist2Line(Pbase,L2005,distfun = distHaversine)[,1]
D2018=dist2Line(Pbase,L2018,distfun = distHaversine)[,1]

```

#Se Guardan las distancias en una lista.

```

DISTANCIAS=list(data.frame(Dis1981=D1981,Dis2005=D2005,Dis2018=D2018))
save(DISTANCIAS,file = "DISTANCIAS.rda")

```

#Se carga la lista (Archivo .rda).

```

setwd("C:/Users/USER/Desktop/Proyecto Olas_final/Analisis")
load("DISTANCIAS.rda")

```

#DISTANCIAS.

```

summary(DISTANCIAS[[1]]$Dis1981)
summary(DISTANCIAS[[1]]$Dis2005)
summary(DISTANCIAS[[1]]$Dis2018)

```

#Se almacenan todas las distancias en un data.frame.

```
data=data.frame(dist_1981=DISTANCIAS[[1]]$Dis1981,dist_2005=DISTANCIAS[[1]]$Dis2005,dist_2018=DISTANCIAS[[1]]$Dis2018).
```

#Se grafica un BOXPLOT.

```
boxplot(data,ylab="metros",main="Distancia desde linea Base hasta la linea de Berma",col=c("#ffcccc","#ffffcc","#99ccff"))
```

```
stripchart(data,col=c("red"),vertical=T,pch=19,cex=0.5,add=T)
```

#Se crea una matriz con las distancias para poder operar entre ellas.

```
DIST=matrix(c(min(DISTANCIAS[[1]]$Dis1981)-min(DISTANCIAS[[1]]$Dis2018),  
              min(DISTANCIAS[[1]]$Dis2005)-min(DISTANCIAS[[1]]$Dis2018),  
              mean(DISTANCIAS[[1]]$Dis1981)-mean(DISTANCIAS[[1]]$Dis2018),  
              mean(DISTANCIAS[[1]]$Dis2005)-
```

```
mean(DISTANCIAS[[1]]$Dis2018)),ncol=2,byrow = T)
```

#Se muestran solo las distancias minimas y promedios.

```
row.names(DIST)=c("min","mean")
```

```
colnames(DIST)=c("1981~2018","2005~2018")
```

```
DIST
```

ANEXO 2



Imagen 1. Estructuras de protección construidos en el borde de las casas de Pacoa.



Imagen 2. Pendiente de la playa de Pacoa.



Imagen 3. Lotes de la playa de Pacoa sin construcciones.



Imagen 4. Vegetación en los lotes vacíos de la playa de Pacoa.



Imagen 5. Construcciones e intervención de material distinto al sedimento local de Pacoa.



Imagen 6. Casa con vista al mar protegida del fuerte oleaje por el enrocado.



Imagen 7. Casa en proceso de construcción.



Imagen 8. Playa de Pacoa en baja mar.



Imagen 9. Berma formada por las condiciones naturales de la playa en contraste con la zona protegida por el enrocado.