



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Programa de Infraestructura del Transporte
Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional

INFORME DE ASESORIA

EIC-Lanamme-INF-1224-2023

**EVALUACIÓN DE RUTA NACIONAL N°23
EROSIÓN COSTERA**

San José, Costa Rica

Agosto, 2023



Documento generado con base en el Artículo 6, inciso c) de la Ley 8114 y lo señalado en el Capítulo II, Artículo 14 del Reglamento del Artículo 6 de la precitada ley, publicada mediante Decreto DE-37016-MOPT.

1. Informe EIC-Lanamme-INF-1224-2023		2. Copia No.1
3. Título INFORME DE EVALUACIÓN, EVALUACIÓN DE LA RUTA NACIONAL N°23., EROSIÓN COSTERA		4. Fecha del Informe Agosto 2023
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Notas complementarias No aplica		
7. Resumen El LanammeUCR ha calculado el Índice de Erosión y Sedimentación Costera (IE-SC) en la Ruta Nacional N°23, específicamente en el tramo Caldera - El Roble. Como resultados, se han identificado y determinando parámetros cualitativos y cuantitativos del grado de erosión costera actual, así como el impacto que tiene en la infraestructura vial. Se cuenta también con la caracterización geomorfológica y la cobertura del terreno, se ha completado la recopilación de datos sobre erosión/acreción, mareas (rangos máximos) y la altura de la ola máxima, así como los datos históricos de eventos que han generado oleaje o aumento en el nivel del mar, con base en información del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) de la UCR. Los resultados confirman que el sector de la Ruta Nacional N°23 más cercano al mar en Caldera tiene una alta susceptibilidad a la erosión.		
8. Palabras clave: Ruta Nacional N°23, escollera, erosión costera, seguridad vial, infraestructura vial	9. Nivel de seguridad Bajo	10. Núm. de páginas 69
11. Preparado por:		
Geol. Paulo Ruiz Cubillo Geólogo UGERVN	Ing. Ronald Naranjo Ureña Ingeniero Civil UGERVN	Ing. Diego Herrera Ingeniero Civil UGERVN
12. Revisado por:		
Ing. Gustavo Badilla, P.hD. Ingeniero Civil PIG	Lic. Giovanni Sancho Sanz Coordinador de Asesoría Legal	Ing. Roy Barrantes Jiménez, MSc, PMP Coordinador UGERVN

13. Aprobado por:

<p>Ing. Ana Luisa Elizondo Salas MSc Coordinadora PITRA</p>		
---	--	--



6.8 TASA PROMEDIO DE EROSIÓN/ACRECIÓN (TE)	45
6.9 ACCIONES ANTRÓPICAS (AA)	46
6.10 SUSCEPTIBILIDAD TOTAL.....	48
7. ESTADO ACTUAL DE LA RUTA NACIONAL N° 23.....	51
7.1 ESCOLLERA DE PROTECCIÓN CONTRA OLEAJE	52
7.2 RELLENO DE LA VÍA Y CONDICIONES DE PAVIMENTO.....	55
7.3 SISTEMA DE MANEJO DE AGUAS	58
7.4 DESEMBOCADURA DEL RÍO BARRANCA	60
7.5 SEGURIDAD VIAL.....	61
8. VALORACIÓN DE RIESGO DE CONECTIVIDAD.....	62
9. CONCLUSIONES.....	63
10.RECOMENDACIONES	64
11.REFERENCIAS.....	66

1. POTESTADES

El presente informe se enmarca en las funciones de evaluación bienal de la red vial nacional pavimentada, que los Artículos 5 y 6 de la Ley No. 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributarias encomienda a la Universidad de Costa Rica, a través del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LANAMMEUCR) “para garantizar la máxima eficiencia de la inversión pública de reconstrucción y conservación óptima de la red vial costarricense”. De igual forma, en el inciso g), que le otorga la tarea de brindar asesoramiento técnico a los jefes del MOPT como una herramienta de complemento a la gestión de la Administración.

2. OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN

El objetivo principal de la evaluación es brindar de forma oportuna información relevante y actualizada para la toma de decisiones por parte de la Administración, en cuanto a la susceptibilidad por erosión costera, mediante la evaluación y el seguimiento de la condición que presenta la Ruta Nacional N°23 en el tramo entre Caldera y El Roble y que ha sido afectada por el oleaje, mareas altas y corrientes litorales durante el presente año.

3. METODOLOGÍA Y ALCANCE DE LA EVALUACIÓN

En esta sección se describen procesos y flujos de diagrama de las metodologías utilizadas en cada uno de los apartados de este informe, así como el origen de los datos topográficos con los que se generaron los modelos de elevación digital.

3.1 Datos topográficos

Sobre la Ruta Nacional N°23 en el tramo entre Caldera y el Roble, se trabajó en las zonas con mayor cercanía a la línea de costa. Esta zona cuenta con una base topográfica a partir de datos LiDAR con resolución de 4 puntos/m² que fueron suministrados por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) y con fotografías aéreas de alta resolución de entre 10 y 15 cm, estos datos fueron obtenidos en año 2017 por la empresa AERODIVA S.A. Esto permitió al LanammeUCR hacer un mapeo geomorfológico con gran detalle para la determinación de la susceptibilidad a erosión costera.

Aunque se cuenta con estos datos para las zonas cercanas a la playa, hay zonas de la Ruta Nacional N°23 que no están cubiertas por LiDAR debido a que se encuentran a más de 800 m de distancia de la costa. Para esos sectores, se completó con información del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). Además, para el tramo más cercano a la costa en Caldera, durante el año en curso se hicieron al menos cuatro vuelos con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para hacer fotogrametría y generación de modelos de elevación del terreno.

Para el estudio geomorfológico también se utilizaron fotografías aéreas convencionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de los años 1945, 1974, 1984, 1997 y que complementadas con imágenes satelitales de Google Earth y Sentinel 2.

El VANT utilizado para la captura de imágenes fue un Phantom 4 RTK y los ortomosaicos y modelos de elevación digital, se hicieron con lo Software Metashape-Agisoft y Claude Compare. El análisis de datos se hizo con Surfer y Global Mapper que también funcionan para los datos LiDAR.

3.2 Índice de Erosión Sedimentación Costera (IE-SC)

La Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional de LanammeUCR ha venido trabajando el tema de erosión costera desde el año 2017 con la realización del proyecto de investigación: Caracterización geológica de sitios susceptibles ante la erosión costera en el tramo Carrillo-Ostional de la Ruta Nacional N°160. El proyecto de Aragón 2019, aporta la adaptación de una metodología para determinar los sectores más vulnerables de una carretera al proceso de erosión costera basándose en aspectos geomorfológicos, geológicos y geotécnicos.

Para determinar el estado actual de la zona con respecto a la erosión costera, se utiliza el índice de Erosión y Sedimentación Costera (IE-SC), metodología propuesta por Cárdenes & Obando (2006) y modificada por Aragón (2019) como diagnóstico de los procesos erosivos que se presentan en la actualidad. El IE-SC es una metodología semi-cuantitativa que se desarrolló para el estudio de los intensos procesos de erosión-sedimentación en áreas costeras que podrían afectar actividades humanas, en este caso el transporte en un sector de la RN-23.

Este índice clasifica información que se recopila en campo o mediante la ayuda de sensores remotos acerca de los procesos de erosión-sedimentación que ocurren en las costas evaluadas, se basa en observaciones y evidencias físicas del medio geológico de la zona donde se aplica. Por otra parte, para conocer los sitios más susceptibles a sufrir erosión costera, se usa la metodología propuesta por Gornitz et al. (1991) y modificada por Alves et al (2011) y Aragón (2019) permitiendo relacionar variables físicas de una manera cuantificable y que expresa la vulnerabilidad relativa de la costa ante cambio físicos.

Una vez recopilados los datos, se analiza la susceptibilidad ante erosión costera al realizar una sumatoria de parámetros intrínsecos al terreno con un respectivo peso según su importancia, enfatizando así en la variable de geología, donde se utilizan los resultados de los ensayos de laboratorio de Análisis Granulométrico y Resistencia a la Abrasión con la máquina Los Ángeles para caracterizar las rocas y sedimentos del área.

Los resultados de la evaluación se presentan en mapas que despliegan el nivel de intensidad de los procesos erosivos para cada segmento de la línea de costa. En la Figura 1 se resume la metodología aplicada para determinar este aspecto del estudio en la RN-23.

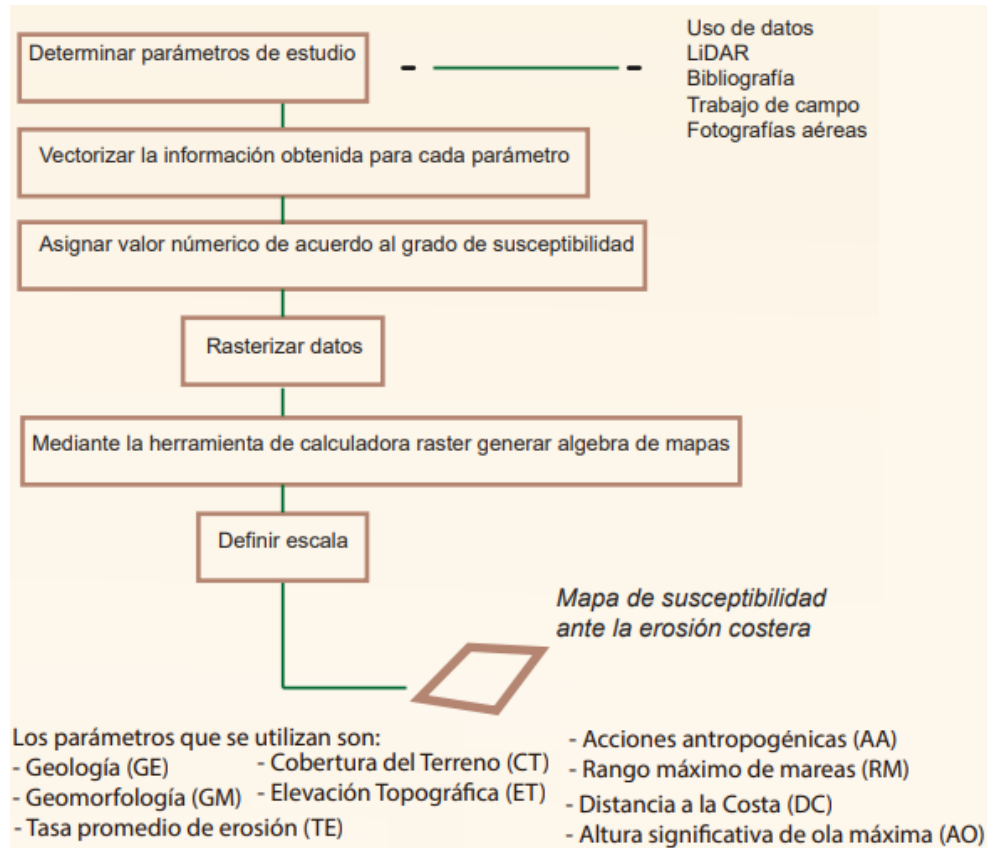


Figura 1. Mapa conceptual de la metodología utilizada para determinar el Índice de Erosión y Sedimentación Costera (IE-SC) para el sector de la ruta 23.

Como parte de la metodología de trabajo, se establecen los datos de los parámetros de Geomorfología (GM), Geología (GE), Cobertura del Terreno (CT) que fueron determinados a partir de las imágenes LiDAR y del SNIT con su respectiva comprobación de campo.

Para el análisis del parámetro de tasa promedio de erosión acreción (TE), se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2 para determinar la variación espacial en las tasas de cambio de la línea de costa mediante la Tasa de Regresión Lineal en diferentes transectos a lo largo del tramo de estudio, estos datos fueron obtenidos del Sentinelhub (<https://www.sentinel-hub.com/>). En la Figura 2, se resume la metodología utilizada para determinar este parámetro y en la Tabla 1 se resumen las fuentes de entrada de todos los parámetros analizados en este trabajo para el IE-SC.

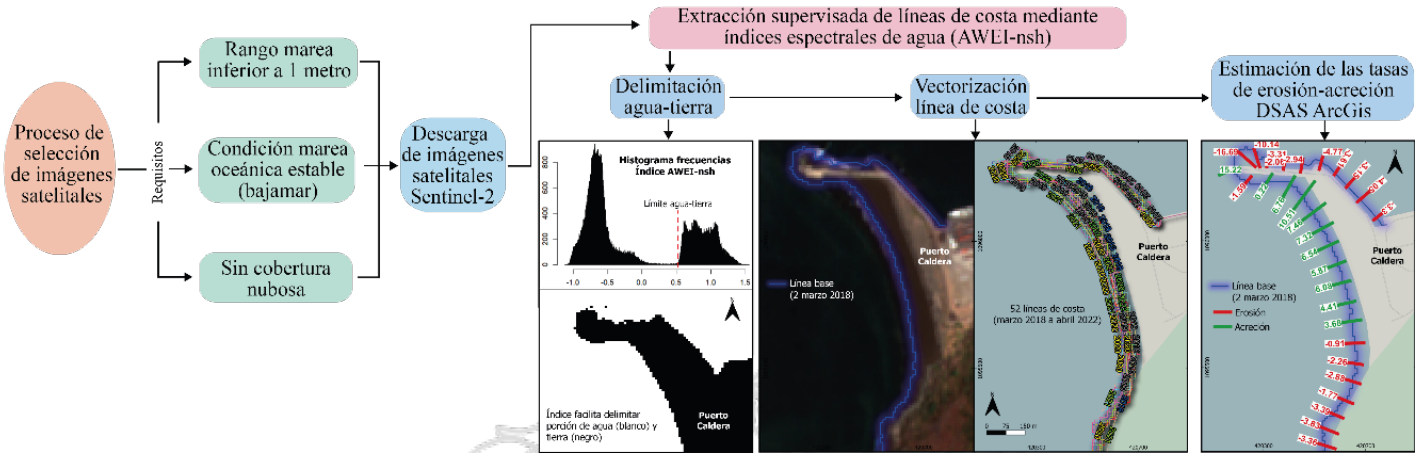


Figura 2. Mapa conceptual de la metodología utilizada para determinar el parámetro de tasa promedio de erosión acreción (TE)

Tabla 1. Resumen las fuentes de entrada de los parámetros analizados para el IE-SC

Parámetro	Fuente
Elevación topográfica (ET)	Geoprocesamiento de los datos LiDAR disponibles para este proyecto
Distancia a la línea de costa (DC)	Geoprocesamiento de los datos LiDAR disponibles para este proyecto
Geología (GL)	Trabajo de campo
Geomorfología (GM)	Elaboración para este informe mediante fotografías aérea, MED LiDAR y observaciones de campo.
Cobertura del terreno (CT)	Elaboración para este informe mediante fotografías aérea, MED LiDAR, observaciones de campo e información en el Atlas digital de Costa Rica 2014 (Ortiz-Malavassi, 2014)
Rango máximo de mareas (RM)	Digitalización de Lizano (2006). Verificado con tablas de IMN y CIMAR-UCR
Altura de la ola significativa máxima (AO)	Digitalizado a partir de los datos de Lizano (2007)
Tasa promedio de erosión/acreción (TE)	Imágenes satelitales Sentinel-2 para determinar la variación espacial en las tasas de cambio de la línea de costa mediante la Tasa de Regresión Lineal

Parámetro	Fuente
Acciones antrópicas (AA)	Elaboración para este informe mediante fotografías aérea, MED LiDAR y observaciones de campo.

Los mapas que se obtuvieron para cada uno de los parámetros analizados y que muestran el grado de susceptibilidad ante erosión costera, fueron correlacionados con la matriz de susceptibilidades propuesta por Cárdenes & Obando (2005) y con las modificaciones de Álvarez et al. (2011) y Aragón (2019) Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de clasificación de la susceptibilidad ante la erosión costera modificada de Álvarez et al. (2011) y Aragón (2019)

Grado de susceptibilidad	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto
Parámetros	1	2	3	4	5
Elevación Topográfica (ET) (m s.n.m.)	>30	>20 ≤30	>10 ≤20	>5 ≤10	≤5
Distancia a la línea de costa (DC) (m)	>1000	>200 ≤1000	>50 ≤200	>20 ≤50	≤20
Geología (GL)*	Sustrato rocoso			Sustrato blando	
	Rocas con coef. Los Ángeles <20	Rocas con coef. Los Ángeles ≥20 <40	Rocas con coef. Los Ángeles >40	No consolidados Gruesos. Predominancia de partículas con tamaño mayor a 0,074 mm	No consolidados Finos. Predominancia de partículas con tamaño menor a 0,074 mm
Geomorfología (GM)*	Cerros, colinas y montañas	Acantilados rocosos	Planicies aluviales o marinas	Plataformas de abrasión	Playas, dunas, estuarios, desembocaduras
Cobertura del terreno (CT)	Bosque	Vegetación cultivada y granjas	Sin cobertura	Asentamientos rurales	Urbanizado e industrial
Rango máximo de mareas (RM) (m)	>1	≥1 <2	≥2 <4	≥4 <6	≥6
Altura de ola significativa máxima (AO) (m)	>3	≥3 <5	≥5 <6	≥6 <7	≥7
Tasa promedio de erosión/acreción (TE)	>0	>-1 ≤0	>-3 ≤-1	>-5 ≤-3	≤-5
Acciones antropogénicas (AA)*	Intervención que protege la costa de la erosión		Sitios sin intervención humana	Intervención que contribuye a la erosión de la costa.	
	Alta protección	Baja protección		Leve	Grave

La susceptibilidad de zonas costeras ante la erosión se da mediante la sumatoria de 9 mapas que son básicamente parámetros a los que se les da un peso según sea su importancia y que corresponde a cada sitio en el área de estudio. Se lleva a cabo mediante un Sistema de Información Geográfica, QGIS en este caso. La interrelación de toda la información en un único mapa de susceptibilidad tiene como fin crear una herramienta eficaz para determinar zonas susceptibles, contribuyendo con la Administración en temas de mantenimiento de infraestructura, ordenamiento y planificación.

Cárdenes & Obando (2005), proponen también utilizar las características en la costa que se presentan en la *Tabla 3*, para identificar el nivel de erosión-sedimentación para cada segmento evaluado con la aplicación del IE-SC. En el presente estudio, también se incorporan estas características y se utilizan como una revisión de los resultados obtenidos de la modelación.

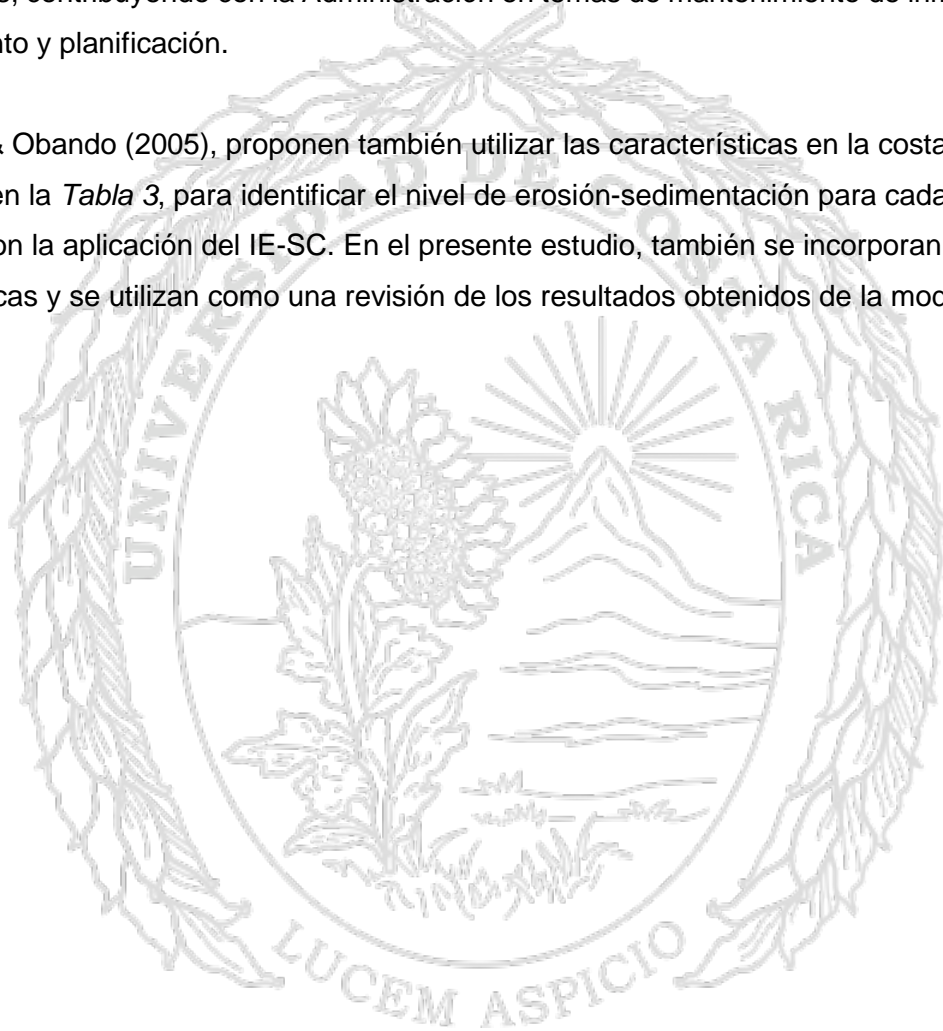


Tabla 3. Niveles definidos para la aplicación del IE-SC según Cárdenes & Obando (2005)

Nivel	Características
1. Erosión-sedimentación no apreciable	Estas zonas no presentan ninguna de las características que poseen los demás niveles. Esto no quiere decir que no haya procesos de erosión-sedimentación, sino que se debería de realizar observaciones durante periodos más largos de tiempo, puede que los cambios sean muy sutiles.
2. Erosión-sedimentación muy leve	<ul style="list-style-type: none"> - Raíces de árboles, palmeras, arbustos y vegetación costera en general expuestas cerca del límite de marea alta normal. - Terrazas de sedimento no consolidado (arena o suelo) de tamaño menor a 50 cm. - La infraestructura se encuentra a distancia considerable de la línea de costa y la erosión costera no representa un peligro verdadero para esta.
3. Erosión-sedimentación media	<ul style="list-style-type: none"> - Raíces de árboles, palmeras y arbustos se encuentran expuestas cerca de la línea de marea alta, puede haber árboles de tamaño considerable basculados. Esto indica que hay una pérdida importante del sustrato. - Terrazas de erosión con tamaño entre 50 cm y 1 m. - La infraestructura se encuentra a pocos metros de la línea de marea alta pero no ha sido impactada aún por el oleaje. - No existe infraestructura de protección ante el oleaje.
4. Erosión-sedimentación fuerte	<ul style="list-style-type: none"> - Las raíces de las plantas cerca de la línea de marea alta han sido fuertemente erosionadas, presentando esta exposición total o al menos grave. Los árboles de tamaño considerable se encuentran basculados al punto que están cerca de caer, han sido tumbados por completo o han sido removidos por el oleaje. - Se presentan terrazas de erosión de tamaño considerable, por lo general sobrepasando 1 m de alto, incluso algunas pueden llegar a los 2 m de altura. - La infraestructura costera se encuentra muy cercana al frente de erosión, a pocos metros de ser impactada por el oleaje, esta corre peligro de ser afectada a corto plazo. - Existen infraestructura para la protección ante el oleaje como: muros de concreto o roca, sacos con arena, chatarra, llantas, gaviones, entre otros. Estas aún no presentan daños o los daños son leves.
5. Erosión-sedimentación muy fuerte	<ul style="list-style-type: none"> - Las raíces de árboles y palmeras se encuentran totalmente expuestas; árboles de tamaño considerable han sido tumbados. - Terrazas de erosión con alturas mayores de 1,5 m. - Existe infraestructura de protección costera, pero esta ha sido afectada, ya sea destruida por completo o parcialmente, desplazada o enterrada por arena. También puede que esta infraestructura provoque afectación en otros sectores del litoral. - La infraestructura costera como: casas, hoteles, carreteras, puentes, etc. ha sido removida totalmente, parcialmente o sus bases han sido erosionadas de manera que su colapso es inminente.

3.3 Riesgo potencial de pérdida de conectividad

En la evaluación del tramo entre Caldera y El Roble y sitios evaluados, se incorpora una valoración técnica, por medio de observación y del entorno, de lo que se ha denominado "riesgo potencial de pérdida de conectividad" y se han definido tres niveles de riesgo potencial debido a la erosión costera.

1. **Riesgo potencial bajo.** Cuando las condiciones del sitio observadas revelan una probabilidad de generar, bajo ciertas condiciones del entorno, una pérdida parcial de la conectividad del corredor, pero con posibilidades de recuperar esta conectividad con intervenciones pequeñas o cuando la sección muestre algún nivel de redundancia en la conectividad (rutas alternas o condiciones topográficas favorables) o sea una ruta que forma parte de la red básica de acceso o de los conectores de Integración territorial definidos en el Plan Nacional de Transportes.

2. **Riesgo potencial medio.** Cuando las condiciones del sitio observadas revelan una probabilidad de generar, bajo ciertas condiciones del entorno, una pérdida significativa de la conectividad del corredor, con la posibilidad de recuperar esta conectividad con intervenciones importantes, pero con algún nivel de redundancia en la conectividad (rutas alternas o condiciones topográficas favorables) o sea una ruta que forma parte de la Red de Distribuidores Regionales definida en el Plan Nacional de Transportes.

3. **Riesgo potencial alto.** Cuando las condiciones del sitio observadas revelan una probabilidad de generar, bajo ciertas condiciones del entorno, una pérdida total de la conectividad del corredor, con la posibilidad de recuperar esta conectividad con intervenciones mayores y con poca o nula redundancia en la conectividad (inexistencia de rutas alternas o condiciones topográficas favorables) o sea una ruta que forma parte de la Red de Alta Capacidad definida en el Plan Nacional de Transportes.

NOTA: Una adaptación de este criterio ha sido utilizado para la valoración en el informe LM-IC-D-0955-2020 del 28 de octubre de 2020 y fue empleado por la CGR en el informe de auditoría, Nro. DFOE-IFR-IF-00014-2020 del 14 de diciembre de 2020.

3.4 Alcance y limitantes

Este proyecto incluye observaciones realizadas por LanammeUCR desde el año 2019 en el sector de Caldera presentadas preliminarmente (Ruiz et al., 2019 & Vindas et al 2022). Hasta ahora este tiempo ha sido suficiente para observar diferencias producidas por la estación lluviosa o seca, las mareas altas y extraordinarias, así como el efecto del Niño en el año en curso.

Este trabajo cuenta con una base topográfica LiDAR de alta resolución que ha sido actualizada con datos VANT, esto brinda una base topográfica robusta de alta calidad que se ve reflejado en el estudio geomorfológico.

Las actividades humanas y construcción de infraestructura son aspectos importantes que se deben considerar en cambios en el patrón de las corrientes, erosión y sedimentación. El acceso a fotografías aéreas históricas del IGN formó parte de la información revisada para poder analizar la zona previo a la construcción de infraestructura.

En este trabajo se identifican los sitios que actualmente están siendo afectados por erosión costera, se aportan datos cuantitativos y cualitativos de estas zonas y se despliegan los resultados en mapas que incluyan los sitios susceptibles a este proceso. Se utilizan datos oceanográficos como mareas y oleaje máximo, no así modelajes físicos de inundación debido a que se enfatiza en el medio físico geológico de las condiciones actuales del terreno.

Con los resultados generados a partir de los datos LiDAR y fotografías con VANT, la Administración dispondrá de una base de información actualizada, práctica y de alto grado de detalle y precisión que se puede utilizar para la toma de decisiones en temas de manejo de desastres, así como la evaluación y reparación de la infraestructura.

No es un objetivo de este trabajo generar una solución específica a los procesos de erosión costera, ya que esta fuera de las funciones de ley del LanammeUCR. Esta responsabilidad le corresponde al Ministerio de Obras Públicas y Transportes y el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) como instancias de administración activa. Aquí se muestran recomendaciones generales de medidas a tomar para reducir el impacto negativo que genera la erosión costera en la RN-23

Las recomendaciones y soluciones específicas para mitigar el problema de erosión costera en el sector de Caldera y la RN-23 fueron brindadas por el Laboratorio de Ingeniería Marítima y Fluidal (LIMF) en el año 2013 en el informe “Dinámica Litoral y Propuesta de Actuación Para la Estabilización de Playa Caldera”. En ese trabajo se mencionaron hasta seis opciones de intervenciones en la playa para reducir el impacto de la erosión costera en la zona de estudio. Estas soluciones se retoman en este informe y presentan más adelante para la valoración de la Administración. El LIMF hoy en día se conoce con el nombre Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios IMARES de la Universidad de Costa Rica

4. OBSERVACIONES DE LA RUTA NACIONAL N°23

4.1 Localización de la zona de estudio

El tramo evaluado de la Ruta Nacional N°23, se encuentra entre las localidades de Caldera y el Roble de Puntarenas en el sector del Pacífico Central de Costa Rica. Específicamente en el distrito de Espíritu Santo, del cantón de Esparza en la provincia de Puntarenas (Figura 3).

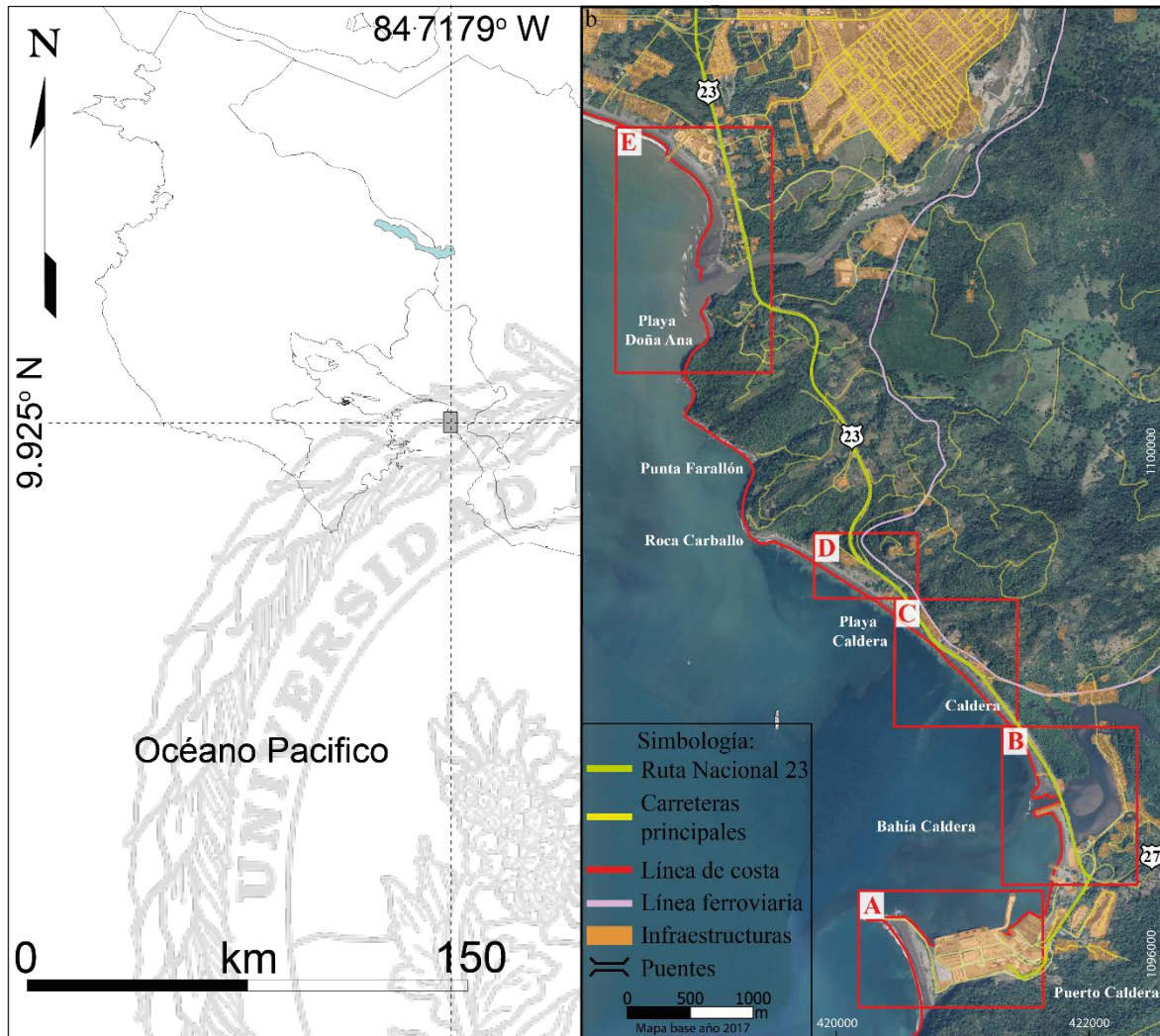


Figura 3. Zona de estudio del sector de la Ruta Nacional N°23, cada uno de los recuadros indica las zonas que han sido caracterizadas en detalle para el análisis de geomorfología y susceptibilidad

La zona de estudio comprende el sector ubicado entre Puerto Caldera y El Roble de Puntarenas, por una longitud de 12 km sobre la Ruta Nacional N°23 y con un área de influencia de 2 km de ancho desde la línea de centro de la carretera. Este tramo de la vía cuenta con un carril en cada sentido (en el sector entre Caldera y Roca Carballo hay un carril extra de ascenso) y es de vital importancia para el flujo de vehículos que utilizan el Puerto de Caldera y la conexión entre la Ruta Nacional N°1, la Ruta Nacional N°27 en sentidos San José - Puntarenas e inverso y Puerto Caldera.

En la *Figura 3*, se observan cinco recuadros que se van a analizar en detalle en cuanto a los cambios que han tenido los rasgos geomorfológicos y a las diferentes obras de infraestructura que están expuestas. En el bloque A. se encuentra el Puerto de Caldera, en el bloque B, el puente sobre el estero de Mata de Limón, el bloque C corresponde con la zona donde la RN-23 cambia su alineamiento y está invadiendo la duna de la playa, el bloque D que es donde se está presentando más acreción sobre la playa y el bloque E que corresponde con el puente que pasa sobre la desembocadura del río Barranca.

4.2 Geomorfología de la zona de estudio

Una caracterización geomorfológica es indispensable para poder identificar las geoformas de la zona que están asociadas a los problemas de erosión y sedimentación. En este apartado se detalla la geomorfología actual de la zona y antes de que se construyeran las obras de infraestructura portuarias.

4.2.1 Geomorfología Local actual

En general la zona de estudio se caracteriza actualmente por ser una costa, con promontorios rocosos, acantilados, plataformas de abrasión, playas con zona baja, zona intermareal y dunas, estuarios (Mata de Limón) y la desembocadura del río Barranca con su respectiva barra arenosa que se desarrolla hacia Puntarenas. También hay morfologías de origen antrópico como: el Puerto de Caldera y su rompeolas, el banco de arena que sirve como aproximación al Puente sobre el estero de Mata de Limón y el enrocado que protege la RN-23 en el sector norte de la playa. La playa que se ubica al oeste del puerto se generó debido al rompeolas. En la *Figura 4* se observa el mapa geomorfológico actual de la zona de estudio

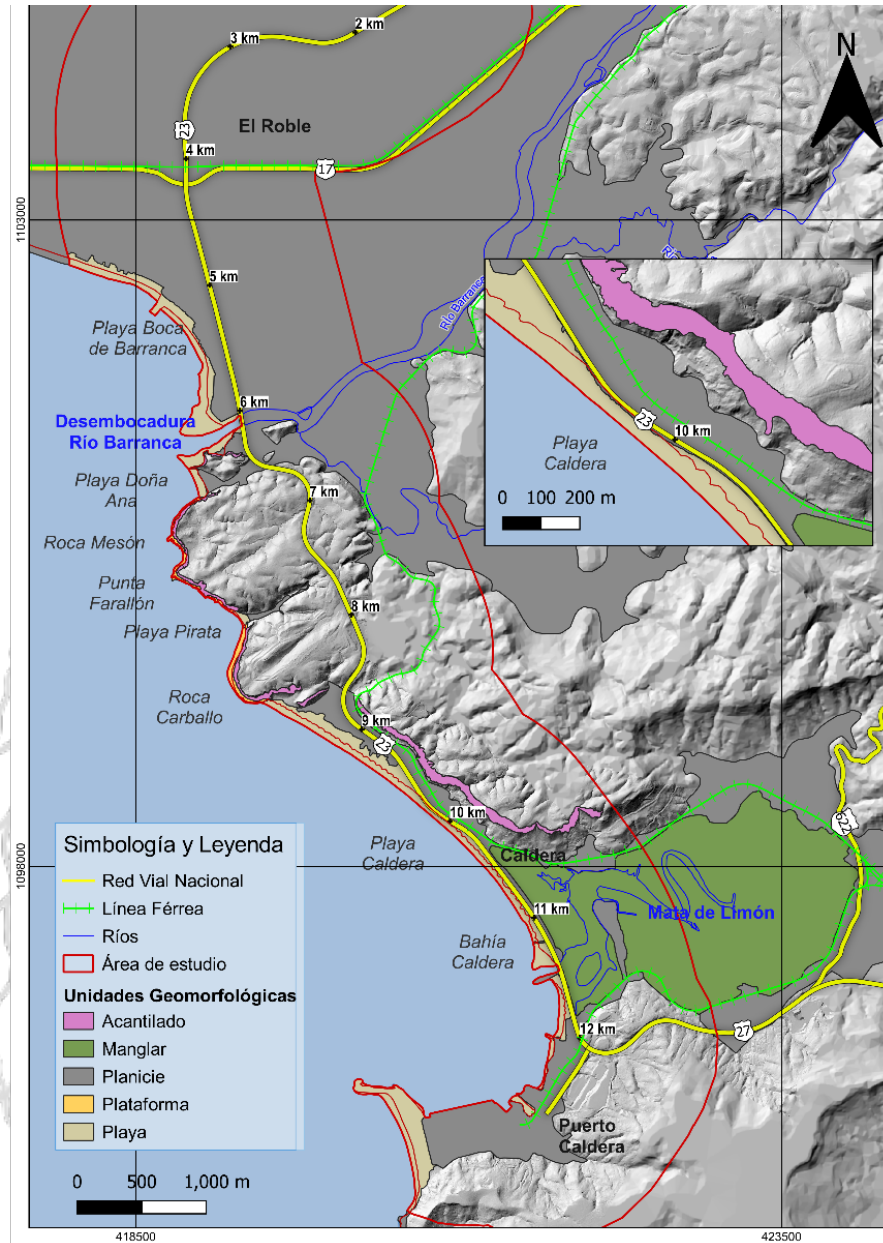


Figura 4. Mapa geomorfológico local de la zona de estudio entre Caldera y El Roble

4.2.2 Geomorfología Local previo al Puerto de Caldera

Antes de la construcción del puerto Caldera y la RN-23, el sector de Caldera estaba constituido geomorfológicamente por un sistema de estuario y barras arenosas con una playa que crecía hacia el noroeste debido a la dirección preferencial de la corriente de litoral alimentada por los sedimentos aportados por el estero de Mata de Limón y Tárcoles. En este caso se omiten los

acantilados y plataformas de abrasión debido a que no han tenido cambios importantes en comparación con la geomorfología actual.

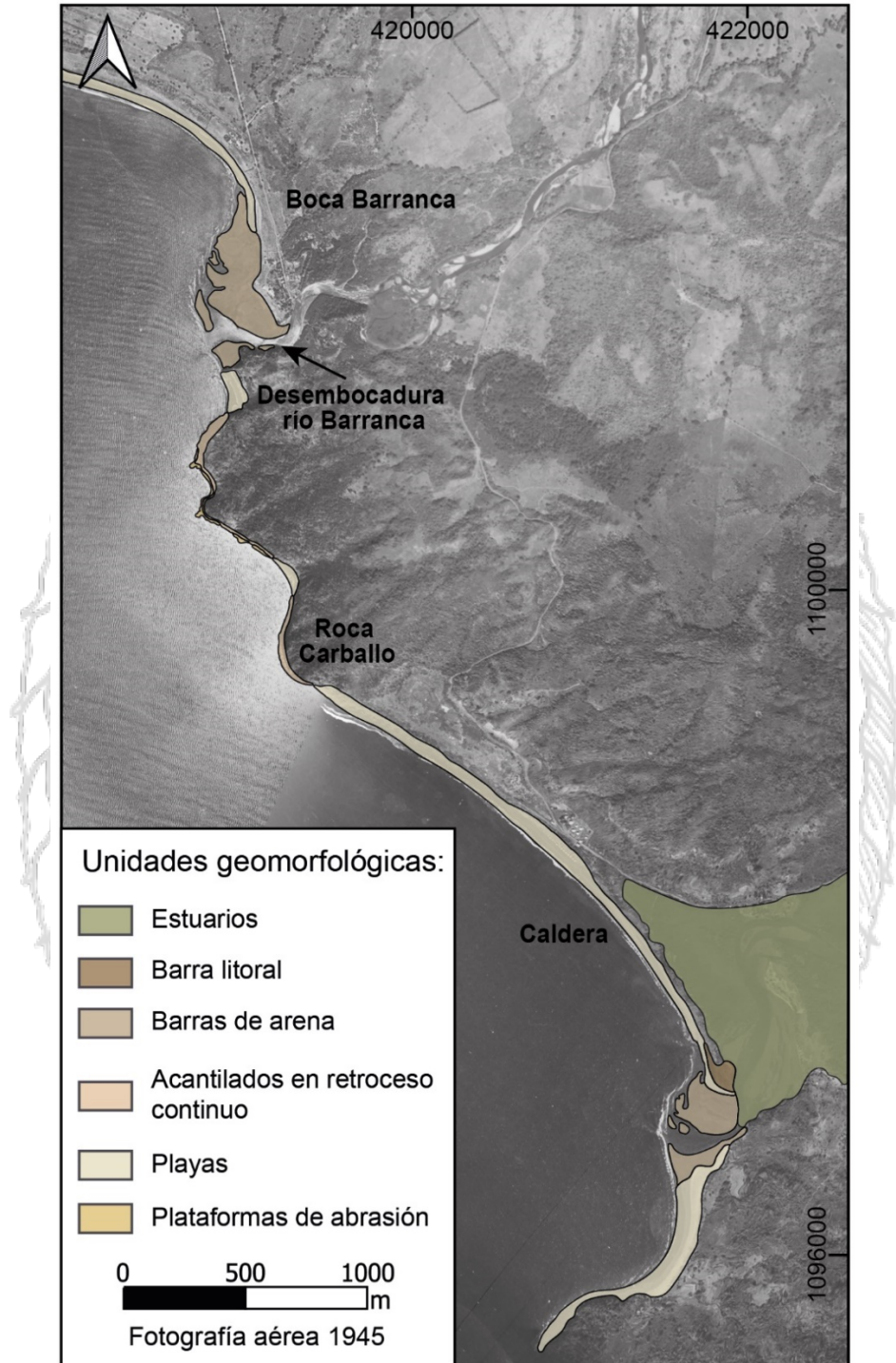


Figura 5. Mapa geomorfológico de la zona de estudio sobre una fotografía aérea del año 1945, antes de la construcción del Puerto de Caldera y la RN-23

Toda la zona y sus morfologías tanto naturales como antrópicas son afectadas por procesos intensos de meteorización y erosión superficial que son típicos de una zona tropical costera. Sin embargo, los procesos de erosión se ven acelerados, en algunos puntos por acción antrópica, como manejo de aguas superficiales, los cambios de transporte litoral e invasión de zonas costeras de las obras de infraestructura. A continuación, se muestran y describen los cambios y las morfologías principales de cada una de las áreas determinadas en la figura 3.

4.2.3 Cambios geomorfológicos

Área A, Puerto Caldera

Para este sector se logró trabajar con fotografías aéreas del IGN desde el año 1945 y 1974 cuando aún no existía el puerto. En una fotografía aérea del año 1984 ya aparece el Puerto de Caldera con el rompeolas. En la *Figura 6* se observan estas fotografías junto con una imagen satelital de Google Earth actual con el Puerto y el rompeolas extendido hacia el sector oeste. Uno de los principales cambios que se observan es la generación de una playa en el sector oeste del puerto. Esta es una playa natural formada por la acumulación de sedimentos debido a la barrera física que representa el rompeolas, en el informe de LIMF 2013, se le llama Playa Nueva. Entre los años 2020 y 2021, el rompeolas ha sido alargado hacia el sector oeste como medida de protección de la infraestructura portuaria.



Figura 6 Evolución geomorfológica del sector del Puerto de Caldera y su rompeolas

Área B, Estero de Mata de Limón

Para este sector se obtuvieron fotografías aéreas del IGN de los años 1945, 1974 y 1984, se complementa con una imagen satelital del Google Earth del año 2023. Esta es una de las zonas que presentaba más cambios de forma natural debido a la gran dinámica del estero de Mata de Limón. Sin embargo, también es una de la que más cambios presentó junto con el puerto debido a la intervención por la construcción de infraestructura. En este caso la instalación del puente y sus aproximaciones, disminuyeron el área de salida y entrada de agua en el sector del estero de Mata de Limón (**Figura 7**).



Figura 7 Evolución geomorfológica del sector del estero de Mata de Limón

Área C, Tramo costero de Caldera

Para esta sección se analizaron fotografías aéreas del IGN de los años 1974, 1984 y una imagen reciente de Google Earth. En este bloque es donde actualmente se encuentra el tramo más afectado de la RN-23 por erosión costera y donde se ha dado la construcción de un enrocado para proteger la vía (**Figura 8**). Además, se ha construido un canal para evacuar el agua pluvial que llega a ese sector y como función derivada también saca el agua cuando el mar rebalsa la vía y dirige el agua hacia el estero de Mata de Limón, aunque no parece diseñado para esa tarea.

El canal está ubicado de forma paralela a la carretera y también funciona como medida de protección para evitar la llegada a la playa de agua de escorrentía que baja de la parte alta.



Figura 8 Evolución geomorfológica del sector costero de Caldera

Analizando el modelo de elevación digital generado con los datos LiDAR se puede observar como la carretera se construyó sobre la parte superior de la playa que existía ahí, específicamente se encuentra sobre la sección de la duna. Esto ha generado que la playa no se pueda regenerar naturalmente de los procesos erosivos. En la **Figura 9** se observa esto junto con una fotografía oblicua de la zona del enrocado, la RN-23 y el canal para la salida de agua.



Figura 9 A la izquierda se muestra un modelo generado con LiDAR. En la fotografía aérea de la derecha, se aprecia la carretera y el enrocado sobre la duna de la playa. En ambas se puede apreciar como la RN-23 invadió la morfología de la zona alta de la playa

Área D, Detalle de playa Caldera norte

Para esta sección se analizaron fotografías aéreas del IGN de los años 1974, 1984 y una imagen reciente de Google (**Figura 10**). De acuerdo a reportes de vecinos, y lo observado en las visitas de campo, se ha determinado que en este sector se han dado procesos de sedimentación y la playa se está colmatando de arena. Cabe aclarar que la RN-23 aún no está siendo afectada por este proceso en ese sector.

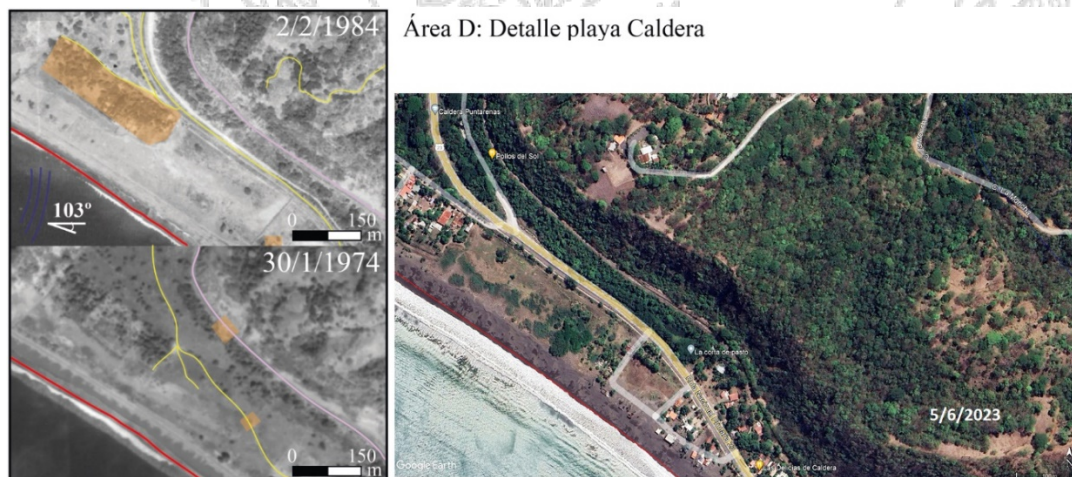


Figura 10 Evolución geomorfológica del sector costero de Caldera

Sin embargo, algunas de las viviendas ubicadas en este sector se ven afectadas por el efecto combinado de las mareas altas extraordinarias y oleaje debido a la entrada de agua y sedimentación de arena (**Figura 11**).



Figura 11 Fotografías del sector norte de playa Caldera donde se da un proceso de sedimentación durante las mareas altas extraordinarias

Área D, Detalle de desembocadura del río Barranca

Para esta sección se analizaron fotografías aéreas del IGN de los años 1945, 1984, 1997 y una imagen reciente de Google. Esta es una zona muy dinámica y de gran aporte de sedimentos provenientes de tierra adentro y acarreados por el río Barranca, estos sedimentos han favorecido a lo largo de los años la formación de la playa hacia el norte (**Figura 12**). Bajo el puente del río Barranca en este sector, se identificaron aspectos que indican que se están dando procesos de erosión debido a la entrada y salida del agua durante los procesos relacionados con mareas altas.



Figura 12 Evolución geomorfológica del sector de la desembocadura del río Barranca

5. ANTECEDENTES AL PROBLEMA ACTUAL

5.1 Variables Condicionantes del Sector de Caldera

Las zonas costeras del territorio nacional son vulnerables a procesos erosivos de fuerte oleaje ocasionados por aumento en el nivel de mar que a su vez se relaciona con el calentamiento global, tormentas intensas, mareas altas y el efecto de ENOS (El Niño) (Lizano 2006, 2007).

El sector de Caldera ha sido afectado por erosión costera en diferentes momentos. Anteriormente, IMARES (2013) identificó que playa Caldera sufre de una inestabilidad cada vez que hay una conjunción de oleajes tipo tormentas (marejadas) asociados a mareas extraordinarias. Por su parte, MIOCIMAR (Lizano 2006) indica que esto se propicia aún más durante los años en los que se presenta el fenómeno del Niño (ENOS). Además, LIMF (2013) indica que las razones de la inestabilidad en Caldera están relacionadas con la construcción del puerto y sus constantes dragados de mantenimiento y el paso de una sección de la RN-23 sobre la duna de la playa.

Durante el presente año se está presentando el fenómeno del Niño y debido a marejadas y mareas altas extraordinarias se ha dado la salida de olas hasta la carretera en el sector de Caldera. Mediante la cámara web de MIOCIMAR que estaba instalada en la zona y la información de los videos capturados en su página web, el LanammeUCR ha podido enlistar los eventos que

han ocurrido durante mayo, junio y julio del 2023 y que afectaron la ciclovía y el enrocado que protegía la RN-23. En la **Tabla 4** se muestran las fechas en que las olas llegaron hasta la carretera.

Tabla 4. *Eventos documentados mediante cámara web de MIOCIMAR con afectación por oleaje en RN23 entre los meses de enero y Julio del 2023*

Año	Mes	Fecha	Pleamar	Bajamar	Hora local	Tipo de evento
2023	5	21-may	01:47 14:26	08:07 20:22	15:59	Salida del oleaje a la calle
2023	5	21-may	01:47 14:26	08:07 20:22	16:22	Salida del oleaje a la calle
2023	5	22-may	02:44 15:21	09:00 21:19	05:03	Olas revientan y salpican la calle
2023	5	23-may	03:38 16:14	09:51 22:13	17:38	Salida del oleaje a la calle
2023	5	23-may	03:38 16:14	09:51 22:13	18:06	Salida del oleaje a la calle
2023	5	27-may	06:57 19:26	00:47 13:02	06:47	Salida del oleaje a la calle
2023	5	27-may	06:57 19:26	00:47 13:02	08:30	Salida del oleaje a la calle
2023	5	27-may	06:57 19:26	00:47 13:02	09:47	Salida del oleaje a la calle
2023	5	27-may	06:57 19:26	00:47 13:02	20:53	Salida del oleaje a la calle
2023	5	27-may	06:57 19:26	00:47 13:02	21:17	Salida del oleaje a la calle
2023	5	28-may	07:48 20:15	01:38 13:52	07:58	Salida del oleaje a la calle, muy fuerte, mueve 2 carros estacionados.
2023	5	28-may	07:48 20:15	01:38 13:52	08:51	Salida del oleaje a la calle
2023	5	28-may	07:48 20:15	01:38 13:52	21:52	Salida del oleaje a la calle
2023	5	31-may	10:55 23:11	04:37 16:53	11:24	Salida del oleaje a la calle
2023	6	5-jun	03:29 15:41	09:19 21:54	14:00	Salida del oleaje a la calle, muy fuerte

Año	Mes	Fecha	Pleamar	Bajamar	Hora local	Tipo de evento
2023	6	5-jun	03:29 15:41	09:19 21:54	14:26	Salida del oleaje a la calle, muy fuerte
2023	6	5-jun	03:29 15:41	09:19 21:54	14:37	Salida del oleaje a la calle, muy fuerte
2023	6	5-jun	03:29 15:41	09:19 21:54	14:45	Salida del oleaje a la calle, muy fuerte
2023	6	5-jun	03:29 15:41	09:19 21:54	15:30	Salida del oleaje a la calle, muy fuerte
2023	6	6-jun	04:16 16:29	10:08 22:42	03:31	Salida del oleaje a la calle y destrucción parcial rompe olas
2023	6	6-jun	04:16 16:29	10:08 22:42	14:01	Salida del oleaje a la calle
2023	6	6-jun	04:16 16:29	10:08 22:42	15:19	Salida del oleaje a la calle
2023	6	6-jun	04:16 16:29	10:08 22:42	16:34	Salida del oleaje a la calle y destrucción parcial rompe olas
2023	6	8-jun	05:56 18:11	11:54 -----	05:23	Salida del oleaje a la calle
2023	7	02-jul	01:24 13:38	07:15 19:58	13:23	Salida del oleaje a la calle
2023	7	04-jul	03:07 15:21	09:03 21:37	15:07	Salida del oleaje a la calle
2023	7	05-jul	03:57 16:13	09:56 22:27	03:52	Salida del oleaje a la calle
2023	7	6-jul	04:47 17:04	10:49 23:16	04:05	Salida del oleaje a la calle

Actualmente la cámara web de MIOCIMAR no está funcionando debido a que el poste donde se encontraba colocada fue removido para realizar los trabajos de conformación y reparación del enrocado. Esta situación impide actualmente el monitoreo en tiempo real de eventos de mareas altas con oleaje fuerte que pueda impactar la ruta nuevamente.

5.2 Soluciones planteadas por LIMF desde el 2013

Basados en estudios de hidrodinámica y sus efectos en la morfología, LIMF 2013, propone seis alternativas para solucionar la problemática de Caldera. A continuación, se resumen esas alternativas.

5.2.1 Alternativa 1

Colocar 8 espigones que llegarían hasta el nivel 0, con una longitud aproximada de 60 m cada uno, distanciados 250 m entre sí. Esta opción no muestra un cambio importante en las corrientes de rotura en comparación a la playa en su condición actual, por lo que se desecha del análisis.

5.2.2 Alternativa 2

Colocar 2 espigones que encierran el sector de playa más corto (donde se dan los problemas con la carretera). Estas dos estructuras se extienden hasta la curva batimétrica $h^* = 5$ m y se construyen con 250 m de espaciamiento entre sí. Además, se hace un aporte de arena con un $D_{50} = 0,3$ mm, para hacer avanzar la playa aproximadamente 30 m. La arena que se aporta puede obtenerse de un bajo ubicado frente a la salida del estero de Mata Limón. Unidos a estos dos espigones, se colocan dos espigones más uno en cada extremo de la playa, atrapando la arena que eventualmente se escape del sistema producto de las corrientes producidas por el rompimiento del oleaje. El espigón del extremo sur también tiene como propósito retener el ingreso de la arena en la dársena del puerto. El espigón del extremo norte daría soporte a la playa y se diseña con una longitud corta, de forma que parte de los sedimentos puedan seguir su camino natural hacia playas del Norte como Playa de doña Ana y Puntarenas.

5.2.3 Alternativa 3

Esta alternativa consiste en construir los mismos espigones extremos de la opción 2, y frente al sector de playa más corto, colocar un dique exento sobre la curva batimétrica $h^* = 5$ m. Entre dicho espigón y la playa se debe agregar $120\ 000\ m^3$ de arena aproximadamente con un $D_{50} = 0,3$ mm, para que la dinámica de las olas forme un tómbolo. Dicha arena de aporte se podría sacar también del bajo frente a la salida del estero.

5.2.4 Alternativa 4

La opción 4 consiste en colocar 7 espigones a lo largo de la playa, similar a la opción 1, pero esta vez extendiendo los espigones hasta la curva batimétrica de 2 m, a excepción de los que encierran el sector de playa que presenta problemas, los cuales se extienden hasta la curva de 4 m. Todos se distancian 250 m entre sí aproximadamente. Se debe también agregar arena al sector problemático para hacer avanzar la playa 15 m aproximadamente.

5.2.5 Alternativa 5

La opción 5 consiste en imitar la opción 3, pero esta vez colocar 2 espigones exentos en la curva batimétrica de 5 m. Uno de ellos se colocaría frente al sector problemático y el otro aproximadamente a la mitad de camino entre la salida del estero y el otro dique exento. Frente a ambos deben inyectarse arena para formar los tómbolos, por lo que se requerirían aproximadamente 240 000 m³ de material. Esto excede la cantidad disponible en el bajo frente a la salida del estero, por lo que sería necesario traer arena de otra parte.

5.2.6 Alternativa 6

La opción 6 consiste en desplazar la carretera lejos de la zona problemática, construir un espigón al norte de la desembocadura del estuario de Mata Limón hasta por lo menos a la batimétrica de 10 m. y depositar el material de dragado del puerto en el centro de playa Caldera para así recuperar el ancho de playa previo a la construcción del puerto.

Con cada una de las alternativas propuestas fueron evaluadas en el documento LIMF (2013) mediante un análisis multicriterio. Ahí LIMF eligió la alternativa número 2 como la mejor, ya que fue la que obtuvo un mayor puntaje, seguida de la 4, luego la 3 y finalmente la 5. Esto hace que según LIMF (2013) la opción más recomendable sea construir los espigones extremos en la playa, y encerrar el sector que presenta mayores problemas con dos espigones más, que lleguen hasta la batimétrica de 5 m, aportar aproximadamente 85,000.00 m³ de arena para hacer crecer la playa en ese sector del orden de los 30 m. La siguiente figura tomada de IMARES 2013, muestra el esquema de la alternativa más recomendable.



Figura 13. Esquema demostrativo de la solución planteada por LIMF 2013, como la más recomendable para atender el problema actual en Caldera.

Mientras no se tome una medida correctiva para solucionar el problema de erosión costera en el sector de Caldera, la vulnerabilidad de la infraestructura vial va a seguir presente. Aunque ya se han visto efectos de la erosión costera en la Ruta Nacional N° 23, en este informe por primera vez se identificaron y cuantificaron las variables que propician la erosión y sedimentación aplicando el IE-SC, en la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos.

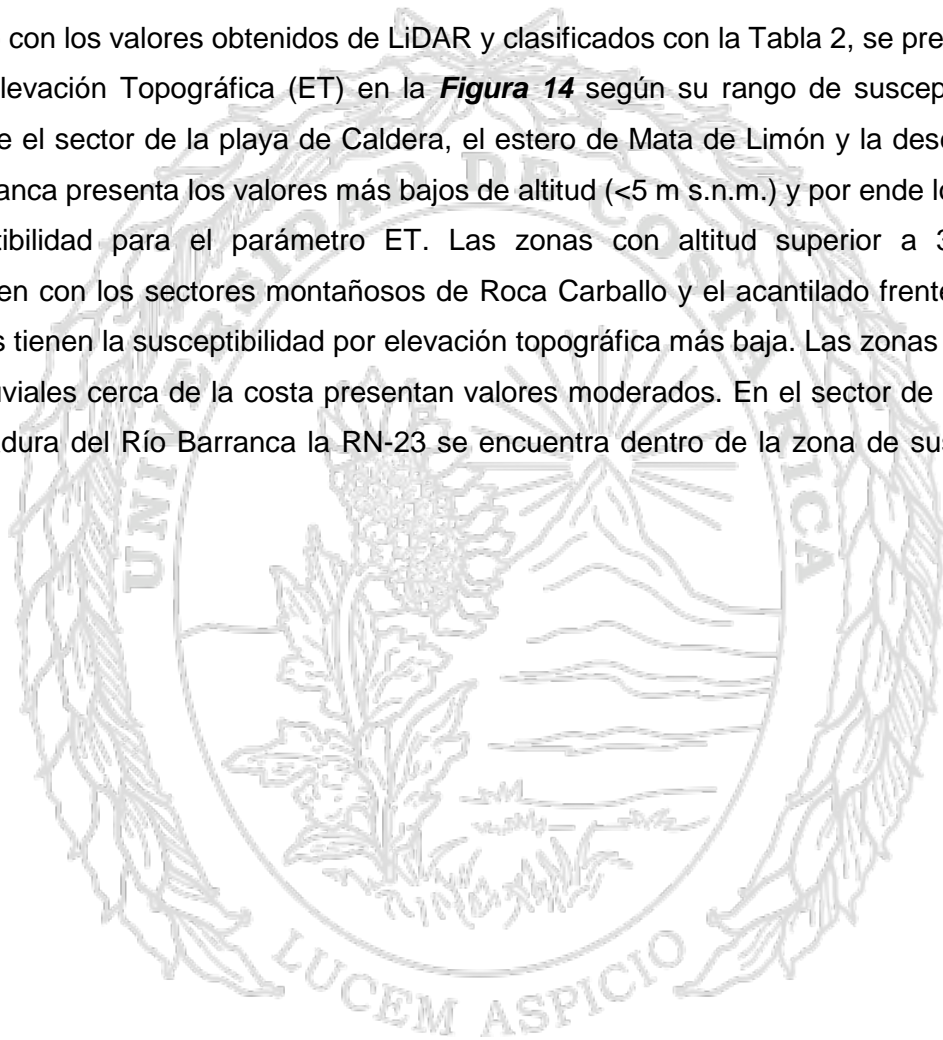
6. EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA RUTA NACIONAL N° 23 SECCIÓN CALDERA EL ROBLE

Se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros involucrados en la metodología de trabajo, junto con el mapa respectivo del área de estudio. En los mapas se muestra un detalle de la zona donde la RN-23 ingresó al sector de la duna de playa Caldera y donde el enrocado se ha visto afectado recientemente.

6.1 Elevación topográfica (ET)

Este valor se obtuvo de los datos LiDAR, corresponde con los datos de altitud en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m) que se despliega en un modelo de elevación digital. Se toma como referencia la matriz de clasificación de la Tabla 2 para darle el peso a cada zona dependiendo de su elevación.

De acuerdo con los valores obtenidos de LiDAR y clasificados con la Tabla 2, se presentan en el mapa de Elevación Topográfica (ET) en la **Figura 14** según su rango de susceptibilidad. Se observa que el sector de la playa de Caldera, el estero de Mata de Limón y la desembocadura del río Barranca presenta los valores más bajos de altitud (<5 m s.n.m.) y por ende los más altos de susceptibilidad para el parámetro ET. Las zonas con altitud superior a 30 m s.n.m corresponden con los sectores montañosos de Roca Carballo y el acantilado frente a Caldera, estas zonas tienen la susceptibilidad por elevación topográfica más baja. Las zonas asociadas a drenajes fluviales cerca de la costa presentan valores moderados. En el sector de Caldera y la desembocadura del Río Barranca la RN-23 se encuentra dentro de la zona de susceptibilidad muy alta.



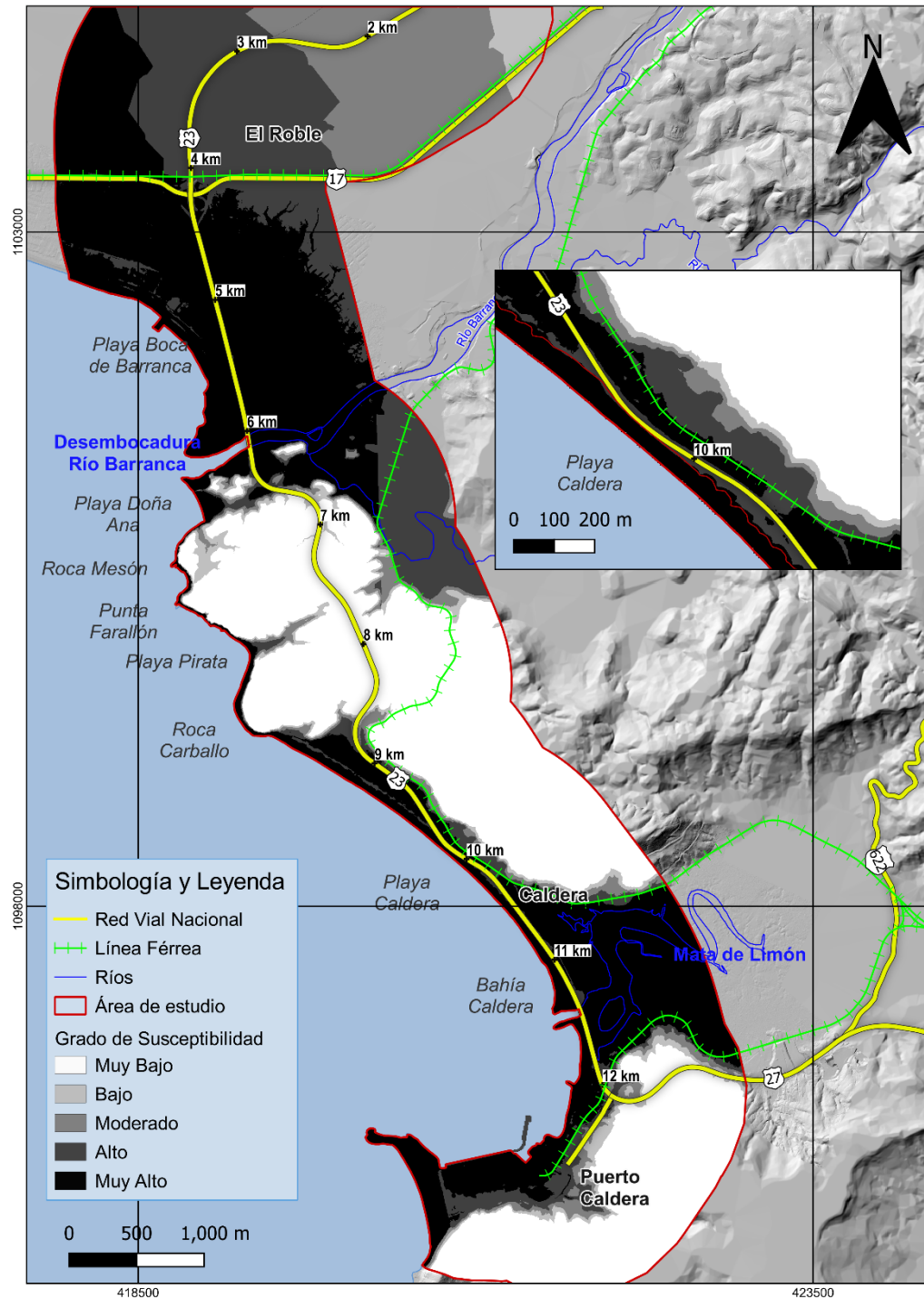


Figura 14 Mapa de susceptibilidad para el factor de Elevación Topográfica (ET) de la zona de Caldera

6.2 Distancia a la línea de costa (DC)

Este valor se obtuvo mediante el MED y QGIS utilizando la herramienta de Multi Ring Buffer para crear a partir de la línea de costa bandas de 5 metros de ancho y extenderla por el área de influencia de 2 km de la zona de estudio tierra adentro. Luego se clasifica de 1 a 5 según los valores de la Tabla 2. Como es de esperar, en la **Figura 15** se observa que las zonas más cercanas a la línea de costa (las playas y desembocaduras) son más susceptibles que las más alejadas. En el sector de Caldera y la desembocadura del Río Barranca la RN-23 se encuentra dentro de las zonas de susceptibilidad alta y muy alta.

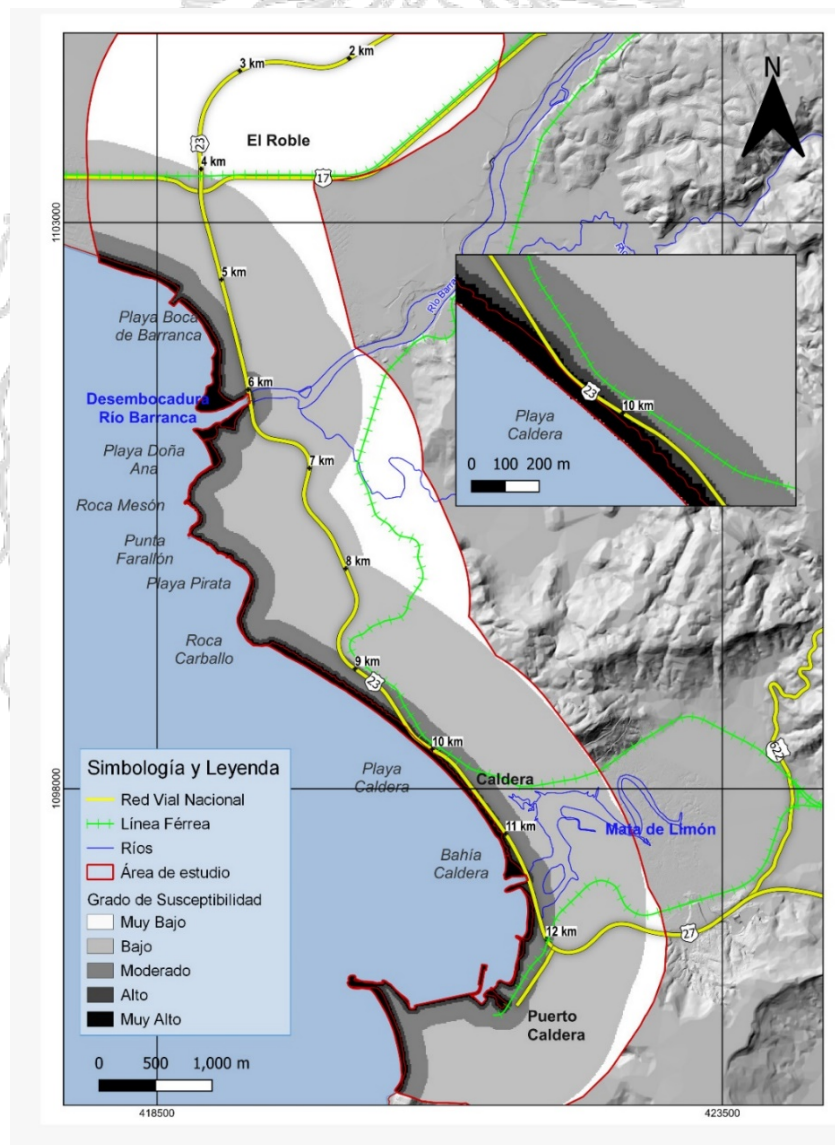


Figura 15 Mapa de susceptibilidad para el factor de Distancia de Línea de Costa (DC)

6.3 Geología (GL)

Las categorías de susceptibilidad geológica se analizan a partir del análisis de material blando y material rocoso. Los materiales blandos se clasifican con los valores 4 y 5, que indican una susceptibilidad alta y muy alta respectivamente. Esto va a depender de los valores obtenidos en los ensayos de granulometría. Mientras que, para los materiales rocosos, los valores van de 1 a 3 y representa la susceptibilidad muy baja, baja y moderada. En este caso dependen de los resultados del ensayo de resistencia a la abrasión en la máquina de Los Ángeles.

Para analizar los materiales blandos, se utilizan los datos de granulometrías de muestras en diferentes puntos de Playa Caldera que aparecen en el informe de LIMF 2013. El análisis de material rocoso se hizo con una muestra de roca tomada en el sector noroeste de playa Caldera donde aflora la Formación Roca Carballo, se considera un valor similar para el resto de las formaciones rocosas del área de estudio. La ubicación de las muestras de sedimentos y roca se puede apreciar en la **Figura 16**.

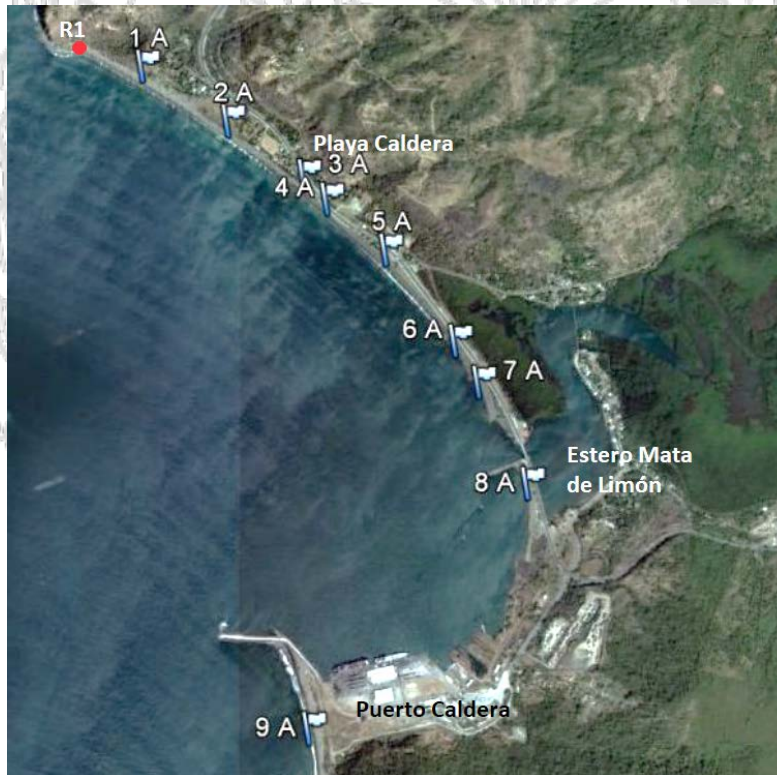


Figura 16. Ubicación de los puntos de muestreo de granulometría y roca en el sector de Caldera (Figura modificada de LIMF 2013).

El punto R1 corresponde con la muestra de roca para la medición de abrasión de la Formación Roca Carballo, los puntos 1A-9A corresponden con las muestras de arenas de las zonas de sustrato blando

En la

Tabla 5 se muestran los resultados granulométricos para cada zona con sustrato blando. De acuerdo con los datos obtenidos (tabla 5) y la correlación con los valores de la tabla 2, todas las zonas corresponden con una susceptibilidad alta debido a que la mayor parte del material queda retenido en la malla de 90 mm indicando partículas con un tamaño superior a 0,074 mm.

Tabla 5. Resultados de los ensayos de granulométricos para cada zona con sustrato blando en el sector de Caldera

Zona	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)
1	0,17	0,37	0,85
2	0,17	0,32	0,92
3	0,18	0,35	0,86
4	0,16	0,34	1,00
5	0,16	0,34	0,95
6	0,13	0,24	0,55
7	0,15	0,32	0,91
8	0,12	0,35	0,96
9	0,11	0,20	0,39

De acuerdo con los resultados de granulometría y la susceptibilidad geológica asociada para suelos blandos se le asigna un valor de alto.

Según los resultados del ensayo de abrasión, el material rocoso muestreado en el sector Roca Carballo corresponde con una susceptibilidad moderada ya que el resultado de abrasión es de > 40. En la Tabla 6 se muestran los resultados de este ensayo.

Tabla 6. Resultado del ensayo de abrasión en la máquina de Los Ángeles

Formación Geológica Muestreada	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	% de pérdida por abrasión
-----------------------------------	------------------	----------------	------------------------------

Piedra Carballo

5000

1950

39

M-1377-2023

Colocando estos resultados sobre el mapa de susceptibilidad geológica (Figura 17), se puede observar que, en el sector de Caldera, el estero de Mata de Limón y la desembocadura del Río Barranca la Ruta Nacional N°23 se encuentra dentro de las zonas de susceptibilidad geológica alta. Los materiales asociados a Roca Carballo corresponden con una susceptibilidad moderada.

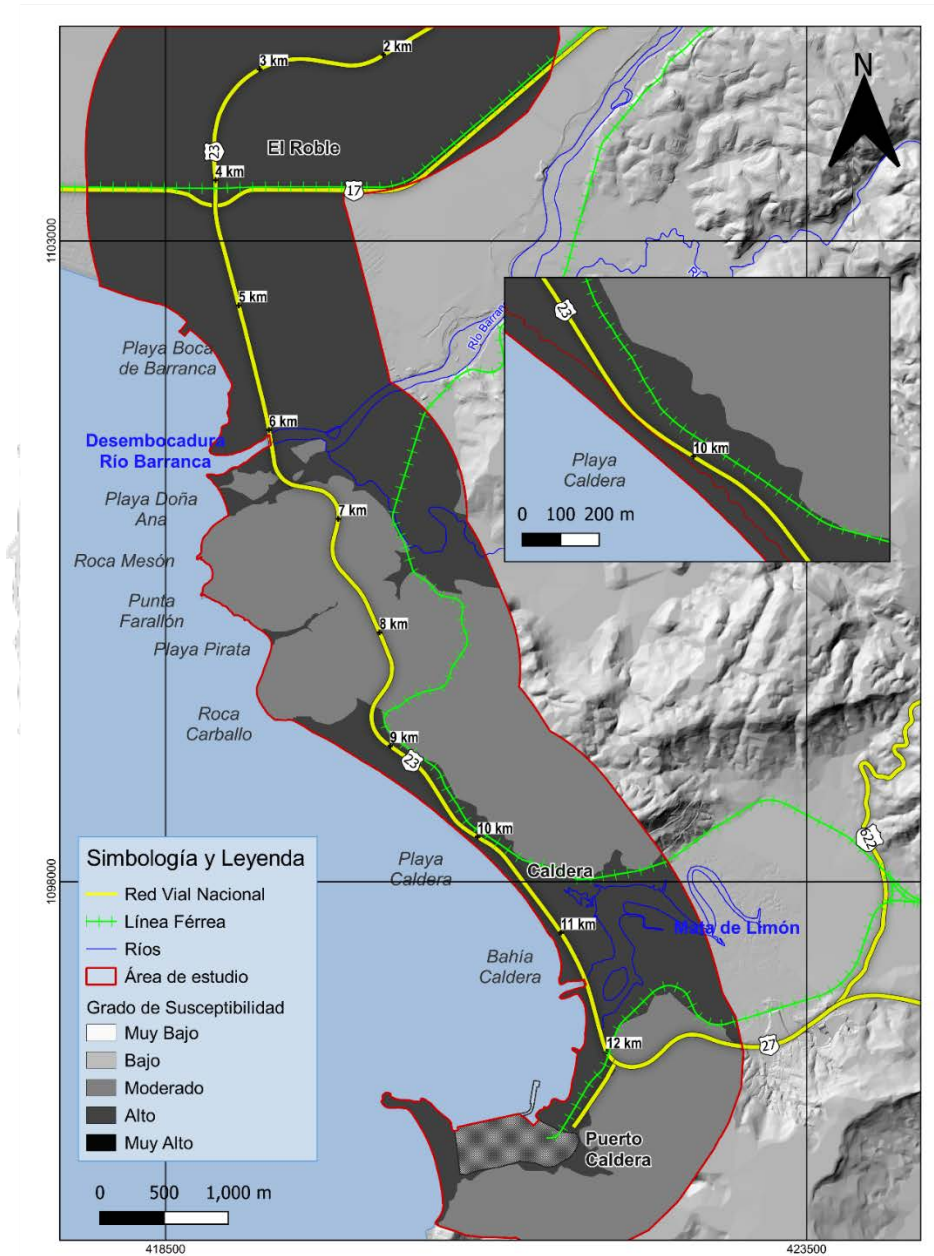


Figura 17 Mapa de susceptibilidad para el factor de Geología (GL)

6.4 Geomorfología (GM)

Este valor se obtuvo mediante la conversión de las áreas del mapa geomorfológico a la clasificación que se sugiere de la tabla 2. Los cerros y colinas van a presentar una susceptibilidad muy baja, los acantilados rocosos de Punta Carballo una susceptibilidad baja mientras que las playas, dunas, estuarios y desembocaduras una susceptibilidad muy alta. En la **Figura 18** se puede ver como en el sector de Caldera y la desembocadura del Río Barranca, la RN-23 se encuentra dentro de las zonas de susceptibilidad muy alta, alta y moderada.

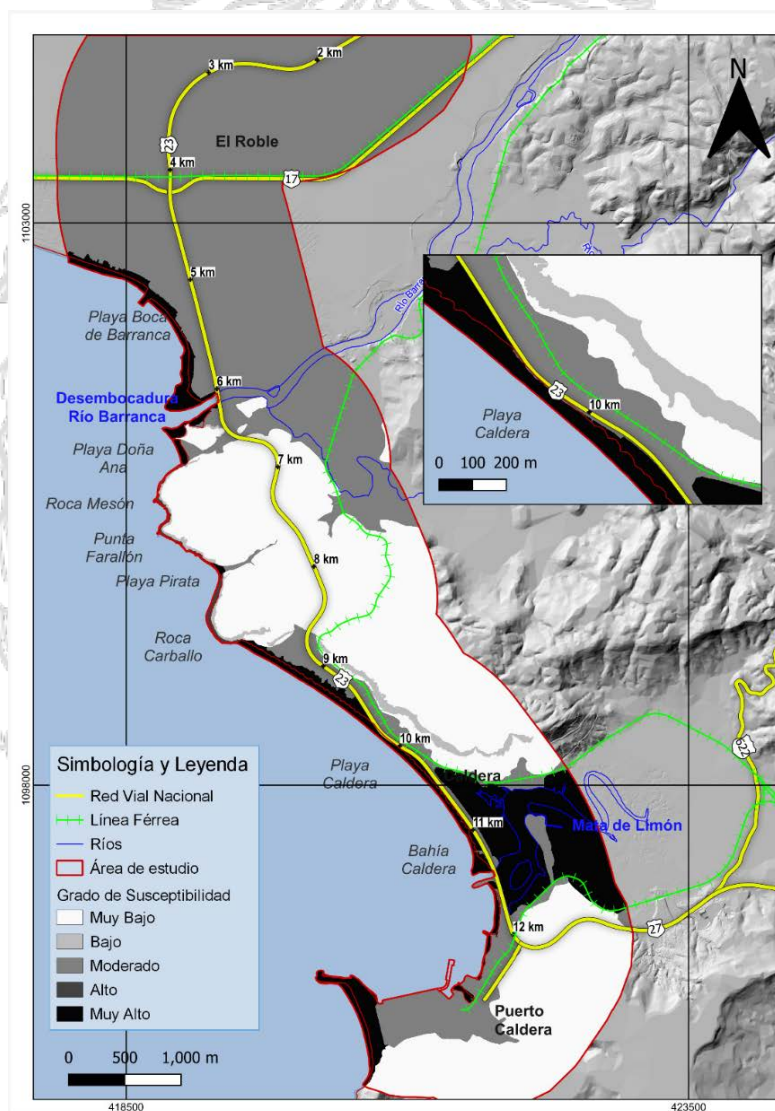


Figura 18 Mapa de susceptibilidad para el factor de Geomorfología (GM)

6.5 Cobertura del terreno (CT)

Este valor se obtuvo mediante la digitalización de las áreas cubiertas del terreno y que se muestra en las fotografías aéreas del IGN e imágenes satelitales de Google Earth. También se utilizó el Atlas 2014 (Ortiz-Malavassi, 2014) para las zonas de cobertura boscosa o sin ella, vegetación cultivada y asentamientos. De igual manera que con los parámetros anteriores, se asignan valores entre 1 y 5 a cada polígono según el grado de susceptibilidad y genera el ráster correspondiente a este aspecto que se presenta en la **Figura 19**.



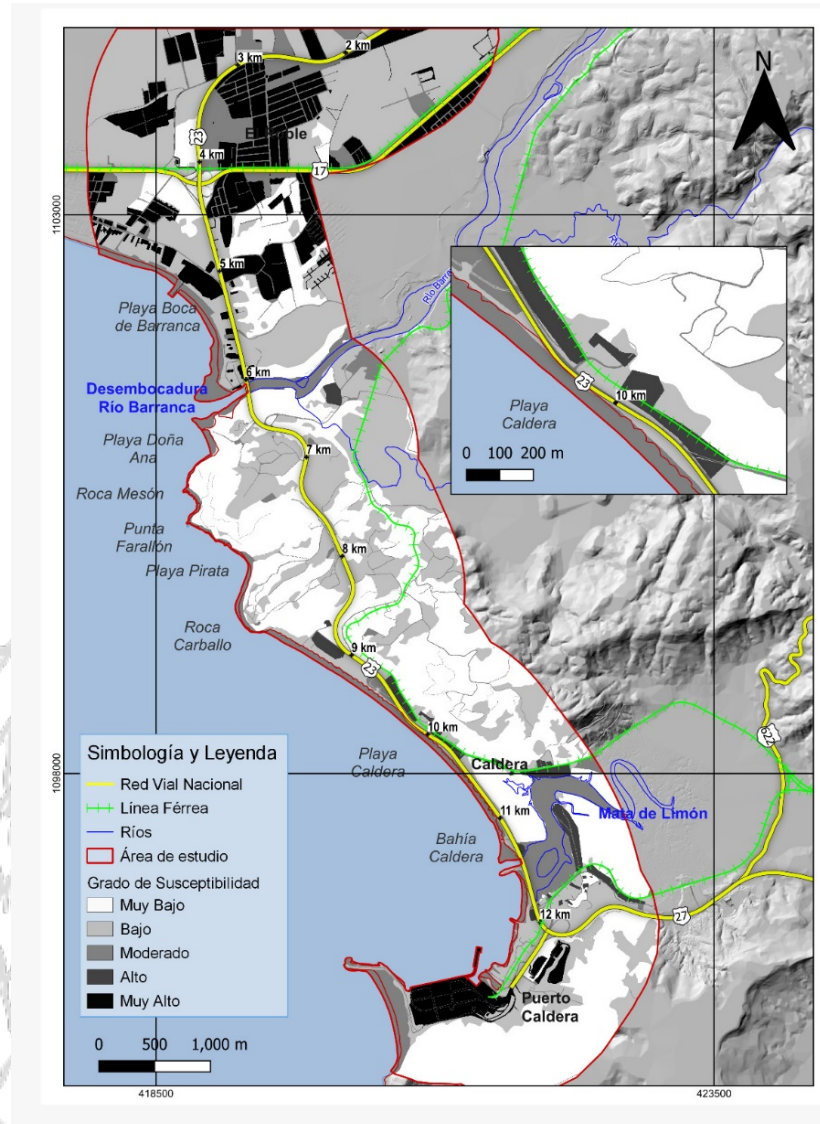


Figura 19. Mapa de susceptibilidad para el factor de Cobertura del Terreno (CT) En el sector de Caldera, el estero de Mata de Limón y la desembocadura del Río Barranca la RN-23 se encuentra dentro de las zonas de cobertura del terreno muy alta

6.6 Rango máximo de mareas (RM)

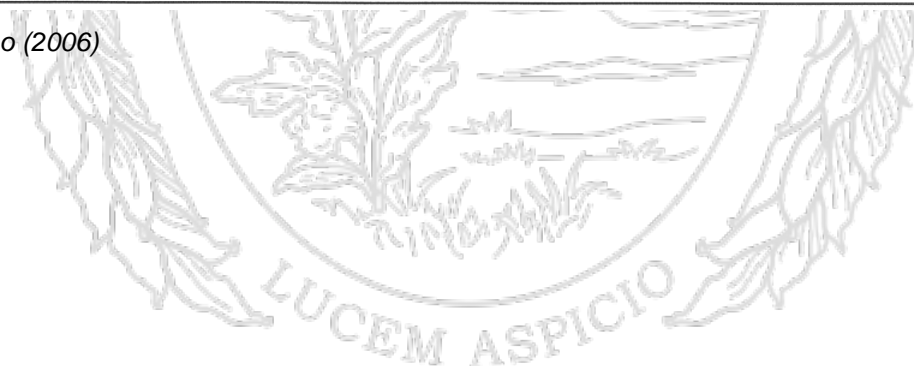
Para este parámetro se utilizó el rango de mareas máximo de Puntarenas (228 - 280 cm), según los datos de las características de los niveles mareográficos de las estaciones del Pacífico de Centroamérica presentados en la **Tabla 7** presentados en el trabajo de Lizano (2006). Esto

implica un valor de 3 que corresponde con susceptibilidad moderada para toda el área de estudio ya que, en este trabajo, no se entra en otras zonas del país. En la figura 20 se muestran los resultados de este parámetro sobre el mapa que afecta únicamente a las playas, litorales, salidas de cauces hacia el mar y zonas muy bajas.

Tabla 7. Niveles de marea de las estaciones del Pacífico de Centroamérica

País	Nombre	Tipo	Posición		Valores Promedio				
			Lat (N)	Long (O)	RP (cm)	PS (cm)	MP (cm)	PP (cm)	PB (cm)
<i>Continuación...</i>									
Nicaragua	Corinto (Isla Cardón)	A	12°29'	087°10'	185	228	115	207.5	22.5
	San Juan del Sur	A	11°15'	085°53'	189	231	115	209.5	20.5
	Puerto Somoza	A	12°12'	086°46'	179	222	109	198.5	19.5
Costa Rica	Cocos Island	A	05°33'	086°59'	213	259	131	237.5	24.5
	Golfo Santa Elena	SC	10°56'	085°49'	228	268	134	248	20
	Bahía Culebra	SC	10°38'	085°40'	228	274	137	251	23
	Puntarenas	SC	09°58'	084°50'	228	280	140	254	26
	Puerto Herradura	SA	09°39'	084°40'	228	280	137	251	23
	Quepos	A	09°24'	084°10'	207	256	128	231.5	24.5
	Bahía Uvita	SA	09°09'	083°45'	228	280	137	251	23
Golfito, Golfo Dulce	SC	08°39'	083°11'	234	289	176	293	59	

Fuente: Lizano (2006)



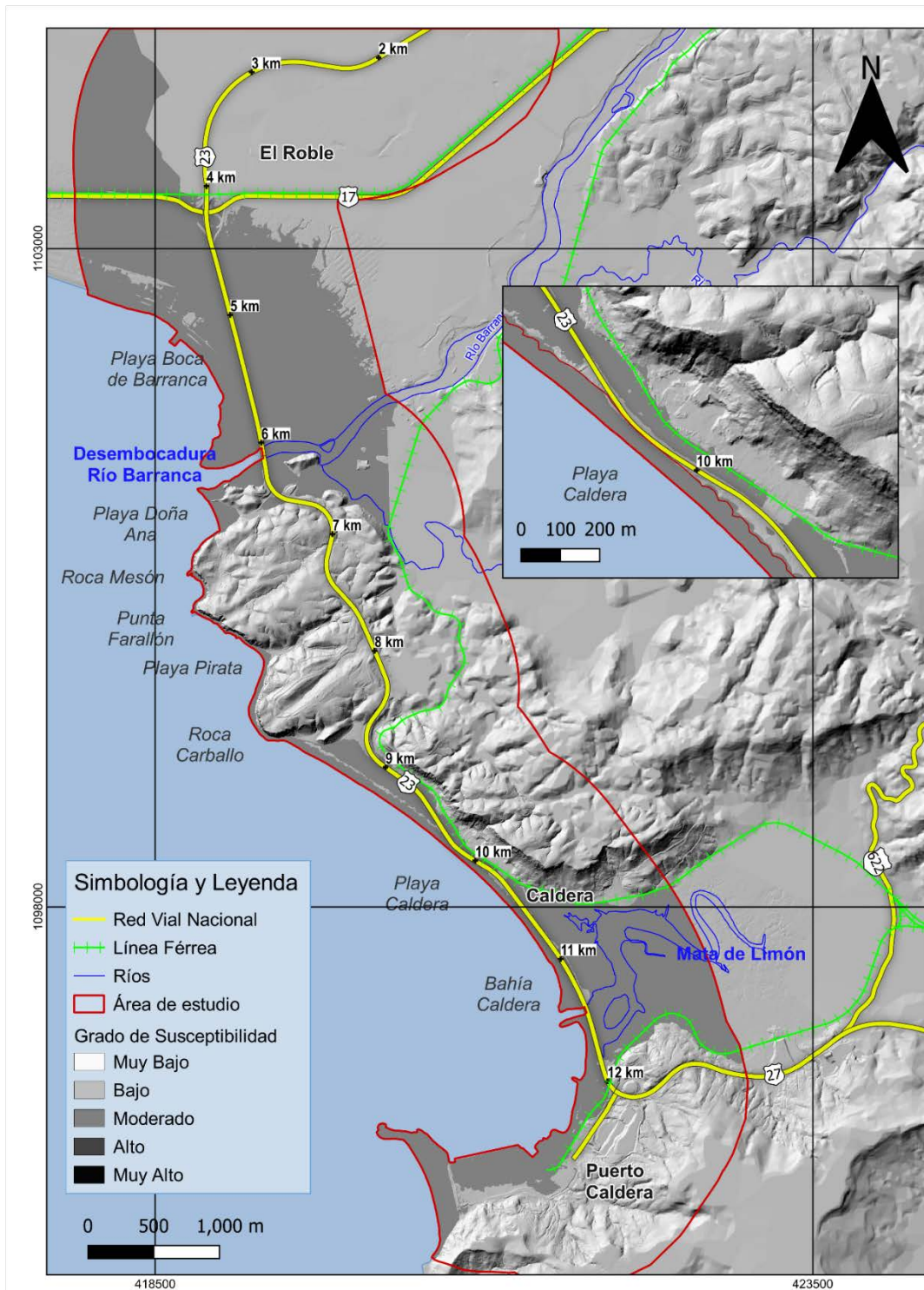


Figura 20 Mapa de susceptibilidad para el factor de Rango de Mareas (RM)

6.7 Altura Máxima de ola significativa máxima (AO)

Para este parámetro se utilizó el dato de Ola Máxima para el Pacífico Central de Costa Rica del trabajo de Lizano (2006), mostrado en la

Tabla 8. Esto implica un valor de 3 que corresponde con susceptibilidad moderada para toda el área de estudio, puesto que el comportamiento es similar para toda la costa del Pacífico Central de Costa Rica, debido a que no existen estudios con mayor detalle a nivel local para la zona de estudio. Es por esta razón que el mapa (**Figura 21**) luce de manera uniforme y de un solo color en su totalidad.

Tabla 8. Datos de Ola máxima para el Pacífico Norte y Central de Costa Rica (Lizano, 2006).

ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LAS SERIES DE VIENTO Y OLA
DE LOS DATOS DE NOAA-NCEP

	Pacífico Norte			Pacífico Central		
	Min	Promedio	Max	Min	Promedio	Max
H1/3 (m)	0,38	1,46	3,28	0,19	1,33	2,81
Tp (seg)	2,94	11,34	19,88	2,58	12,34	19,84
θ_H (°)		1,12			26,48	
W (m/seg)	0.02	5.20	15.03	0,3	3,2	12,57
θ_W (°)		52.55			263.99	

Fuente: Lizano (2006)

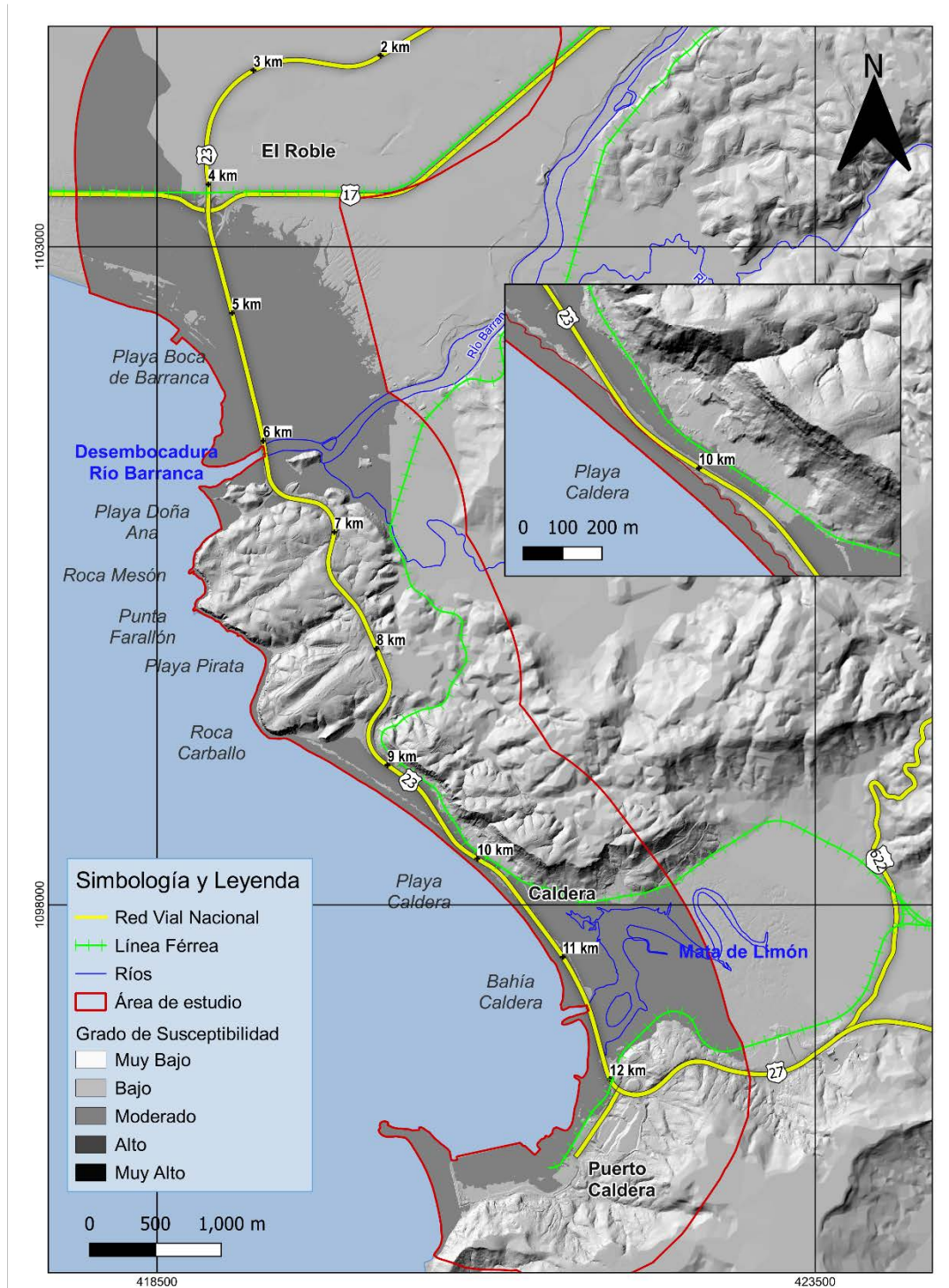


Figura 21 Mapa de susceptibilidad para el factor de Altura de Ola Significativa Máxima (AO)

6.8 Tasa promedio de erosión/acreción (TE)

La metodología que se utilizó para determinar este parámetro fue descrita con detalle en el capítulo correspondiente a metodología. En este caso se utilizaron imágenes satelitales Sentinel, de la franja costera del área de estudio para obtener la tasa promedio de erosión medida en metros. Los resultados presentados en la **Figura 22** muestran zonas con erosión, sedimentación y sin cambios. La RN-23 en el sector de Playa Caldera esta mayoritariamente dentro de zonas que han sufrido erosión costera.

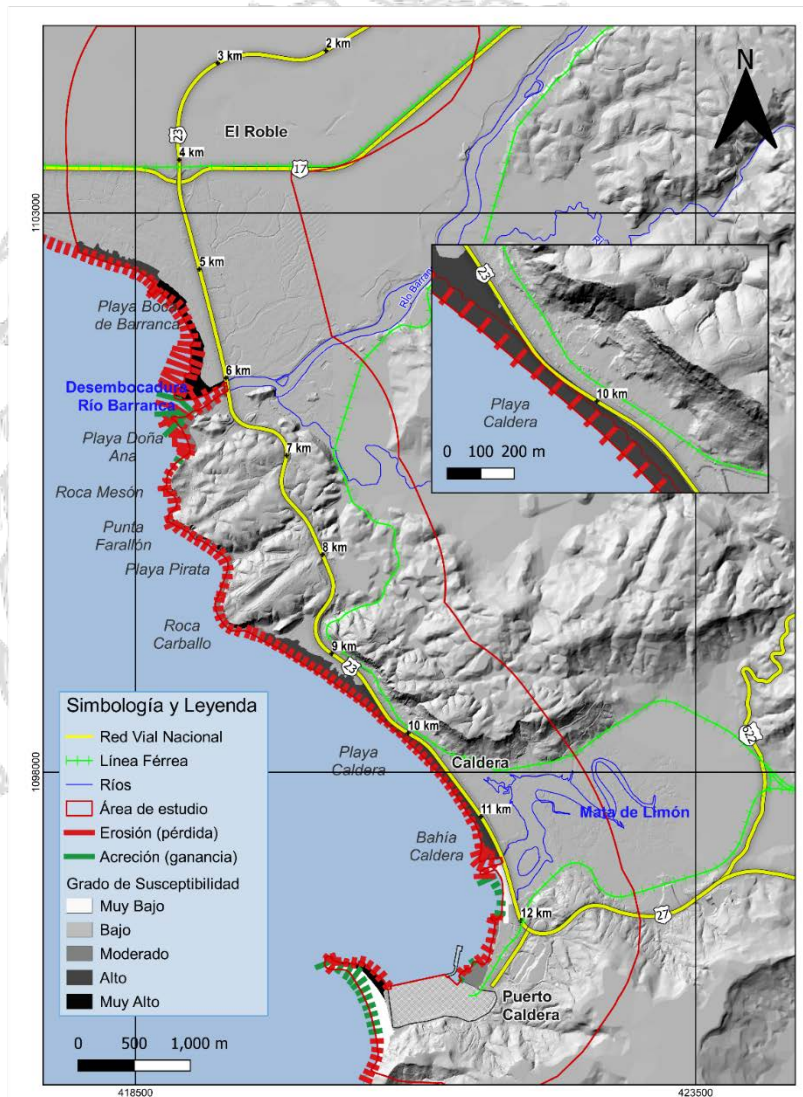


Figura 22 Mapa de susceptibilidad para el factor de Tasa Promedio de Erosión Acreción

6.9 Acciones antrópicas (AA)

Existen acciones realizadas por los humanos que inciden en los patrones naturales de comportamiento de la dinámica costera y que tienen un impacto en los volúmenes de sedimentos en circulación en la línea de costa. La construcción de obras de infraestructura como: proyectos hidroeléctricos, urbanizaciones en zonas dinámicas, carreteras en cordones dunares de las playas, quiebramares así como actividades como extracción de arena y dragados tienden a aumentar la erosión y por tanto las zonas donde existen este tipo de obras o actividades se clasifican como susceptibilidad alta. Por otra parte, obras que favorecen la sedimentación y protección de la línea de costa como dunas artificiales, espolones y barreras costeras se clasifican como susceptibilidad baja.

En la zona de estudio, las obras que favorecen la erosión y se asocian con susceptibilidad alta son: la Ruta Nacional N° 23 en el sector que invadió la playa, las viviendas y edificaciones entre el Pk 9 y 10+500 y en el sector de la desembocadura del río Barranca. Obras como el rompeolas de Caldera y los espolones de la entrada al estero de Mata de Limón favorecen a sedimentación y por eso tienen susceptibilidad baja. El resto de la zona de estudio se clasifica como un valor moderado.

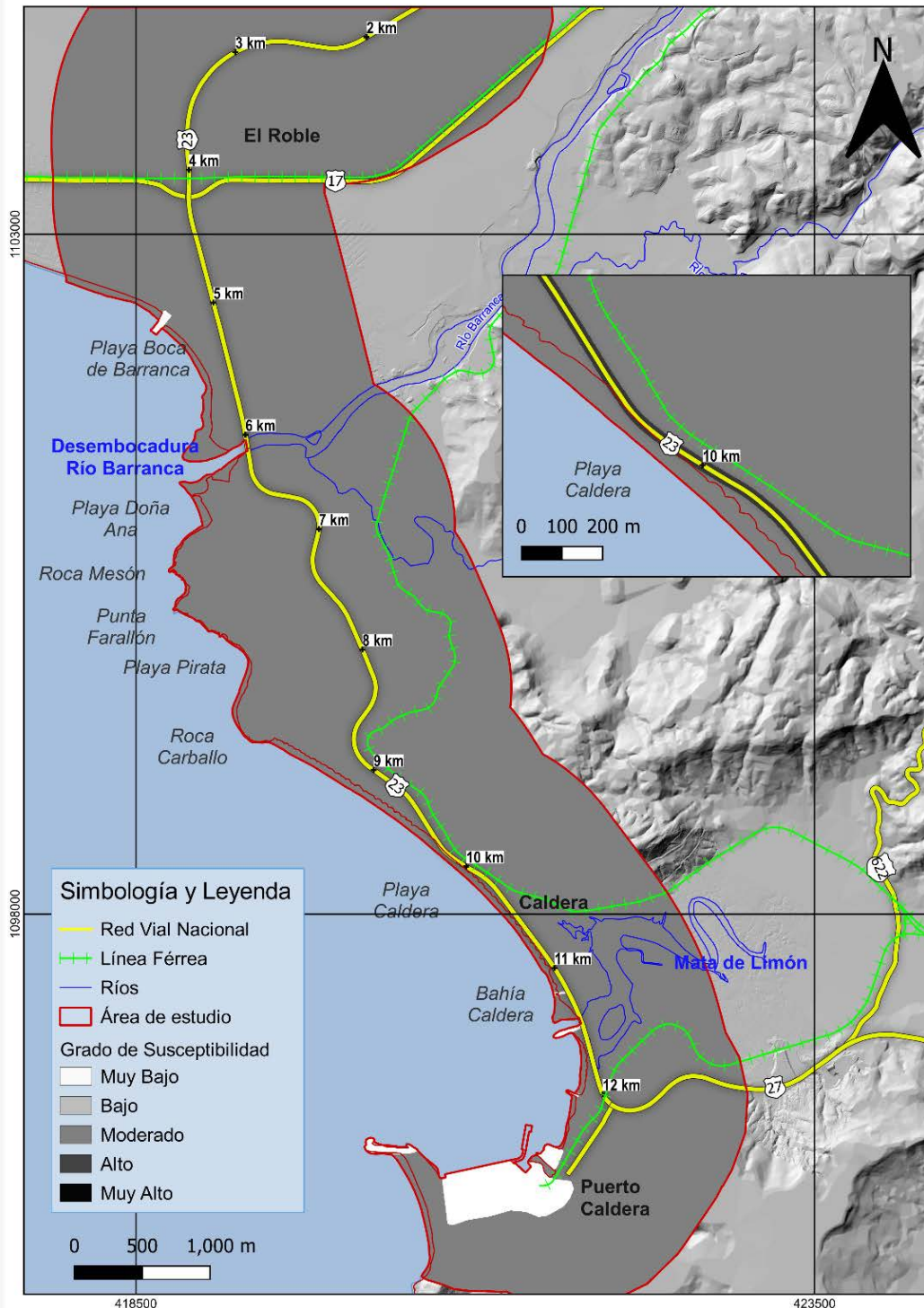


Figura 23 Mapa de susceptibilidad para el factor de Acciones Antrópicas (AA)

6.10 Susceptibilidad total

En congruencia con la metodología de Aragón (2019), para determinar la susceptibilidad total a la erosión costera, se consideró que existen parámetros que son más relevantes que otros y por lo tanto tienen una ponderación mayor que otros. El parámetro que tiene menor importancia es el de Cobertura del Terreno (CT), los parámetros más importantes y con mayor peso son la geología (GM), la distancia a la costa (DC), el Rango de Marea (RM), Tasa de Erosión (TE) y la altura de la Ola Máxima (AO) el resto de los parámetros (ET, GM, y AA) tienen una importancia intermedia. En la

Tabla 9 se muestra la clasificación anterior y los pesos utilizados para cada parámetro.

Tabla 9. Pesos utilizados en la ponderación de los parámetros basado en Aragón (2019)

Peso	Parámetro
0,5	CT,
1	ET, GM, TE, AA
2	GL, DC, RM, AO

En la figura 23 se presenta el mapa de susceptibilidad total a la erosión costera. Se observa como toda la zona de playa Caldera y el sector de Playa Boca de Barranca junto con la desembocadura tienen valores que indican una susceptibilidad muy alta.

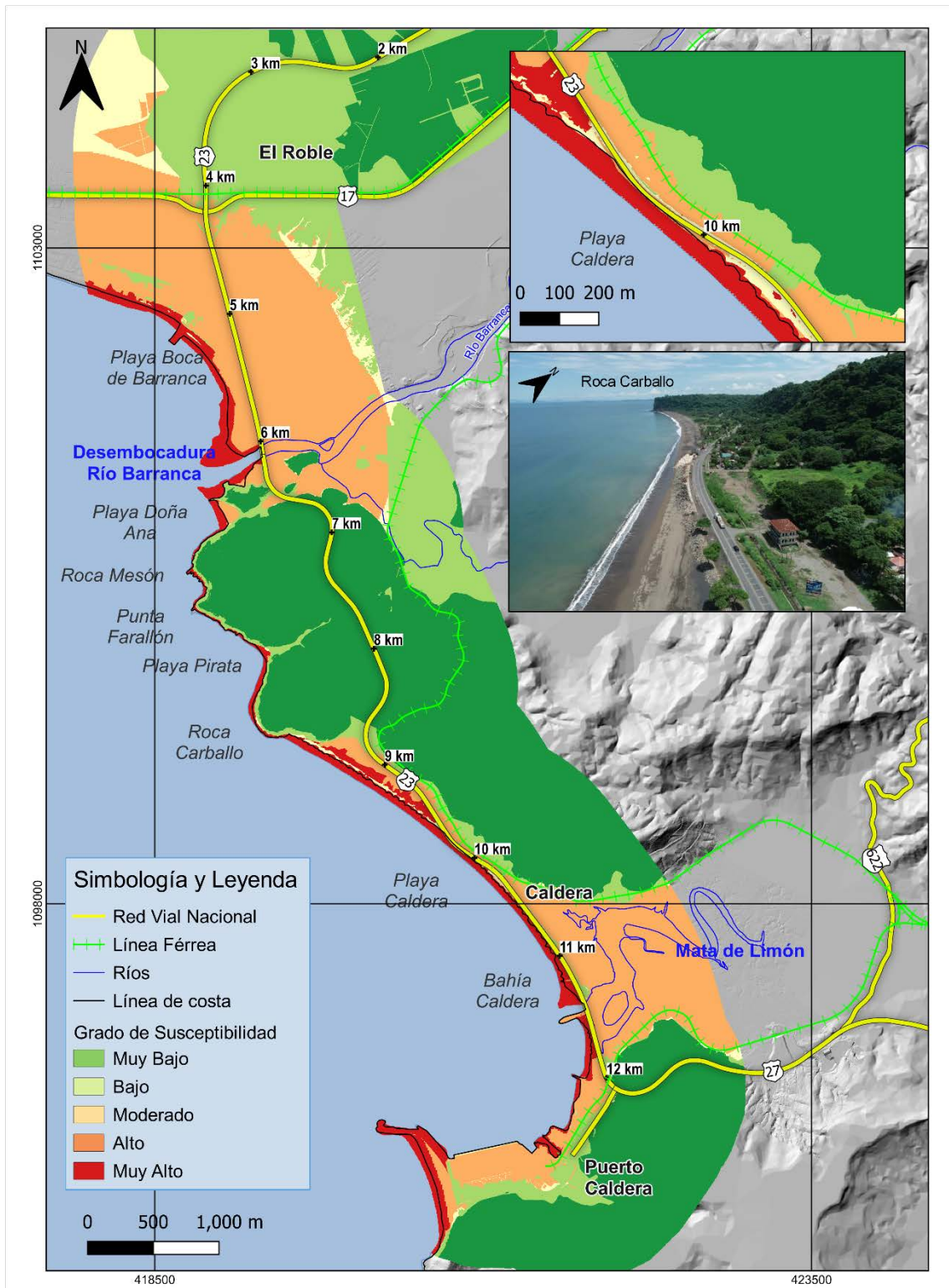


Figura 24 Mapa de susceptibilidad total para la erosión costera de la zona de estudio.

Los valores que se presentan en la línea de costa corresponden con susceptibilidad moderada, alta y muy alta.

Las zonas que concuerdan con susceptibilidad muy alta se ubican en el sector de Playa Nueva (al oeste del Puerto de Caldera), en la playa que está al sur del puente del estero de Mata de Limón, en playa Caldera norte (alejándose de la línea de costa) y en los acantilados de Roca Carballo. Un sector considerable de la Ruta Nacional N°23 se encuentra dentro de esta zona.

Hay sectores de la Ruta Nacional N°23 que se encuentran dentro de las áreas que corresponden con susceptibilidad muy alta, específicamente entre el PK 9+500 y 10+500, es ahí donde actualmente se están dando los problemas de erosión en el enrocado que protege esta vía y que se ha visto afectado durante este año por el fuerte oleaje. Mientras más se aleja la Ruta Nacional N°23 de la línea de costa, se encuentra en zonas menos susceptibles desde moderada a baja y muy baja. La susceptibilidad de la Ruta Nacional N°23 se detalla en la tabla 10.

Tabla 10. Susceptibilidad a la erosión costera de la Ruta Nacional N°23 por estacionamiento cada 500 m en la zona de estudio

Promedio	KM	Susceptibilidad	Rango	Susceptibilidad
20,5	1.5 - 2	Baja	<20	Muy Baja
20,5	2 - 2.5	Baja	20-25	Baja
20,6	2.5 - 3	Baja	25-30	Moderada
21,3	3 - 3.5	Baja	30-35	Alta
21,4	3.5 - 4	Baja	>35	Muy Alta
23,0	4 - 4.5	Baja		
37,0	4.5 - 5	Muy Alta		
33,9	5 - 5.5	Moderada		
31,0	5.5 - 6	Moderada		
32,3	6 - 6.5	Moderada		
18,1	6.5 - 7	Muy Baja		
16,5	7 - 7.5	Muy Baja		
16,5	7.5 - 8	Muy Baja		
16,0	8 - 8.5	Muy Baja		
21,5	8.5 - 9	Baja		
38,2	9 - 9.5	Muy Alta		
35,9	9.5 - 10	Muy Alta		
37,8	10 - 10.5	Muy Alta		
28,5	10.5 - 11	Moderada		
30,1	11 - 11.5	Moderada		
26,9	11.5 - 12	Baja		
23,0	12 - 12.5	Baja		
25,5	12.5 - 12.7	Baja		

Estos resultados, son congruentes con la descripción de lo que corresponde a una zona afectada por erosión fuerte según la Tabla 3 y lo que se observa en el sitio de estudio. En la figura 24 se muestran algunas de las afectaciones: Afectación severa la vegetación de playa, infraestructura de protección costera ha sido afectada y destruida parcialmente, niveles de erosión superiores a 1.5 m.



Figura 25. Fotografía aérea donde se aprecian algunas de las evidencias de la erosión costera severa en el sector de playa Caldera y la Ruta Nacional- N°23

7. ESTADO ACTUAL DE LA RUTA NACIONAL N° 23

En esta sección se hace una descripción de las evaluaciones realizadas durante este año a diferentes componentes de la RN-23, se incluyen la escollera de protección contra las olas, el canal de desagüe de aguas pluviales, el relleno de la vía en el tramo del km 9-10, la ciclovía, el sector de la desembocadura del río Barranca y aspectos de seguridad vial.

7.1 Escollera de protección contra oleaje

El sector donde se encuentra la escollera de protección contra el oleaje está dentro de la sección superior (duna) de la playa. Esta posición y la concatenación de otras variables lo hace susceptible a la erosión costera, especialmente cuando las condiciones de fuerte oleaje se juntan con las mareas más altas. Durante este año y debido a la presencia del fenómeno del Niño, el enrocado sufrió de pérdida de material rocoso y de erosión en la sección de la ciclovía. Mediante un VANT se pudo dar seguimiento desde junio a la escollera y se pudo observar la pérdida de material que la compone, así como los trabajos de reparación. En la figura 26, se muestran las imágenes entre junio y agosto de este sector.

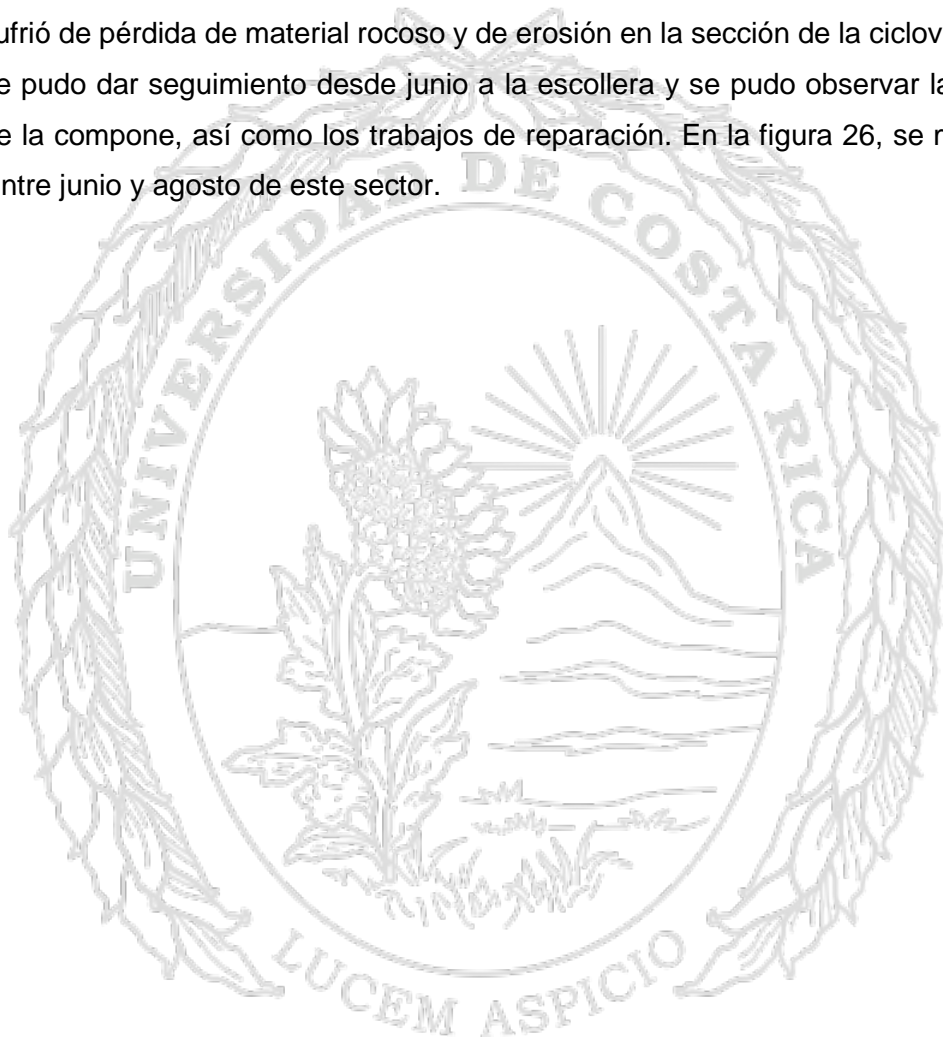




Figura 26. Comparación de la escollera en diferentes momentos entre el 1 de junio y el 3 de agosto del presente año

Una vez que se dio la afectación en la escollera a finales de junio, la Administración inició con prontitud trabajos de reparación durante el mes de julio como se muestra en **Figura 27**. Sobre esta intervención se puede mencionar lo siguiente:

- La zona donde se perdió la escollera y la ciclovía estaba siendo intervenida al momento de la evaluación, se observó que con anterioridad habían colocado bloques de tamaño

decimétrico y el día de la gira, se estaba iniciando la colocación de bloques de tamaño métrico.

- Los bloques de tamaño decimétrico que se colocaron corresponden con lavas y rocas sedimentarias (areniscas). Mientras que los bloques de tamaño métrico corresponden, según la información suministrada, con calizas de la Formación Barra Honda. En la Figura 26 se puede observar como para el 3 de agosto ya estaban colocadas casi en su totalidad los bloques en la sección reparada de la escollera.



Figura 27. En estas imágenes se puede ver la descarga de los bloques de caliza de tamaño métrico y los bloques más pequeños colocados en la escollera

Llama la atención que anteriormente no se habían utilizado rocas calizas para la escollera en el sector de la RN-23. El uso de este tipo de material tiene que considerar varios factores:

- La dureza y durabilidad de las rocas que se están utilizando pues las rocas calizas son relativamente suaves y se desgastan con el tiempo, especialmente en condiciones de alta erosión como las que se encuentran en la escollera de la RN-23. La erosión por las olas del mar, así como la erosión química debido a la salinidad del agua marina, puede desgastar la roca caliza más rápido que otros tipos de roca más duros, como rocas intrusivas o volcánicas. El clima tropical puede afectar la durabilidad de la roca caliza debido a los cambios de temperatura, lluvias intensas, altas tasas de erosión y desgaste.

- En Costa Rica existen otras opciones de roca que podrían ser más duraderas y resistentes a la erosión costera, sin embargo, debe tomarse en cuenta la disponibilidad de este recurso.

7.2 Relleno de la vía y condiciones de pavimento

Se realizó un análisis visual de la superficie del pavimento, específicamente en el tramo que ha mostrado afectación reciente por los altos oleajes y erosión de los elementos de protección, se destacan los siguientes aspectos:

1. La sección del pavimento más vulnerable se trata de un tramo de aproximadamente 200 metros cuya superficie de ruedo está compuesta de un pavimento flexible con una aparente capa de base granular según se aprecia en los cortes existentes.
2. La superficie del pavimento no presenta deterioros estructurales severos. Se identifican ciertas deformaciones plásticas en puntos muy específicos asociados a una incipiente pérdida de material en las capas de base producto de la erosión por efecto del agua superficial (lluvia u oleajes fuertes) y el paso de vehículos pesados.
3. Se identifica una cantidad considerable de material granular fino suelto (arena) en la superficie de ruedo lo que podría significar un riesgo para los usuarios al disminuir la adherencia pavimento – neumático.



Figura 28. Presencia de arena en la RN-23 en el sector de Caldera

4. Existe una diferencia de nivel entre la rasante y la vía marginal que deja expuesta una zona del pavimento que muestra daños por erosión por lo que sería recomendable evaluar la posibilidad de colocar estructuras de manejo de agua superficial o proteger los rellenos al costado del pavimento, para evitar pérdida de soporte lateral del pavimento y eventualmente deterioros importantes que podrían afectar el flujo vehicular (ver figura 29).



Figura 29. Diferencia del nivel entre la rasante y la vía marginal, así como, erosión en los rellenos en la Ruta Nacional N°-23 en el sector de Caldera

5. La presencia de una vía marginal y un canal para manejo de aguas superficiales en una zona cercana brindan un adecuado confinamiento a las capas inferiores del pavimento lo que protege contra el daño a la humedad, a pesar de esto, las capas superiores quedan expuestas a posibles daños (ver la siguiente sección).

6. La pérdida de soporte en las capas superiores también debilita la funcionalidad del sistema de contención presente.
7. Se identifican varias secciones donde se ha perdido la ciclovía generando pérdida de conectividad para los usuarios y la erosión ha causado condiciones riesgosas en ese sitio para el tránsito de bicicletas.
8. Las labores de reconstrucción de la escollera han obligado a interrumpir temporalmente el flujo eléctrico en el sitio de trabajo por lo que se ha disminuido la visibilidad, haciendo necesaria mayor señalización preventiva.



Figura 30. Reconstrucción de escollera en la RN-23 en el sector de Caldera

7.3 Sistema de manejo de aguas

Este canal de drenaje es la principal estructura de manejo de esorrentía superficial en el sector de Caldera donde las olas cubren la vía. Consiste en un canal de concreto, de sección trapezoidal, que se ubica entre los derechos de vía de la Ruta Nacional N° 23 y el Ferrocarril al Pacífico

(**Figura 31**). Este canal tiene una distancia aproximada de 1,4 km y desfoga en el estero de Mata de Limón.

La única condición adversa que presenta el canal es la acumulación de sedimentos y agua en su fondo debido a su baja pendiente, además existe evidencia visual que parte del material presente en el canal es material de las vías marginales a la Ruta Nacional N°23 que fue movilizado por acción del agua (**Figura 31**). Esta condición adversa se está dando debido a que este canal está dando un servicio para el cual no fue diseñado, ya que está evacuando agua mezclada con arena que rebasa sobre la ruta cada vez que las olas ascienden por el talud de roca. Esta situación no se puede resolver con un rediseño o modificación del canal por el nivel bajo de la zona y su cercanía al nivel del mar. Se recomienda limpiar el fondo del canal y remover los sedimentos acumulados para evitar la acumulación de agua, con el fin de mejorar la condición hidráulica del canal y evitar que se generen afectaciones de salud a la población y a la carretera asociadas con la funcionalidad de este. Además, se recomienda el diseño y construcción de cunetas donde sea necesario para evitar la erosión de las vías marginales a la Ruta Nacional N° 23.



Figura 31. Canal de drenaje trapezoidal: sección limpia, pero con agua estancada (izq.) y sección sedimentada (der.)

Se encontró un deficiente manejo de las aguas superficiales provenientes de la escorrentía superficial generada durante eventos de lluvia o bien del agua con sal y arena que rebasa las defensas marítimas de la vía, sobre todo en el costado norte de la RN-23. En este sitio el bombeo

de la vía tiene pendiente hacia tierra adentro, sin embargo, no existe ningún cordón de caño o cuneta que reciba las aguas superficiales y las dirija de forma controlada hacia el canal de drenaje de la **Figura 31**. Esto permite que el agua fluya libremente sobre el relleno de la vía, generando erosión significativa en algunos sitios como se ilustra en la **Figura 32** a la altura de la Escuela de Caldera. Para evitar problemas de erosión de la vía se recomienda el diseño y construcción de un sistema de drenaje que maneje de forma controlada las aguas superficiales de este tramo de la vía y permita su desfogue controlado al canal de drenaje o al mar.



Figura 32. Cárcavas generadas por flujos de agua superficial no controlados sobre el relleno de la Ruta Nacional N° 23.

7.4 Desembocadura del río Barranca

En las giras realizadas a este sector se pudo determinar que el sector de la desembocadura del río Barranca presenta evidencias de erosión costera, específicamente bajo el puente y la zona

de transición entre el río con las aguas del mar. En ese sector se observaron raíces de árboles expuestas y diferencias en las terrazas de erosión de más de 1.5 m (**Figura 33**).



Figura 33. Evidencias de erosión en el sector de la desembocadura del río Barranca

Los resultados del IE-SC, indican que esta zona tiene una muy alta y alta susceptibilidad a la erosión costera (Figura 24). De esta forma el resultado del modelo de susceptibilidad sigue siendo congruente con las observaciones de campo.

7.5 Seguridad Vial

No se observaron señales de tránsito que indique que el sector más afectado por la erosión costera es propenso a tener oleaje que sobrepase la escollera y llegue hasta la vía. En uno de los video conseguidos con MIOCIMAR de la webcam, se puede apreciar como un vehículo estacionado en ese sector es impactado y desplazado por una ola.

En el ámbito específico de la infraestructura de seguridad vial, es indispensable reforzar el señalamiento vial vertical. Para ello se recomienda coordinar los esfuerzos con la Dirección

General de Ingeniería de Tránsito (DGIT), con el fin de proponer las señales verticales más adecuadas para este tipo de peligros. En cuanto a las señales reglamentarias, el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito (SIECA, 2014) permite instalar señales de velocidad restringida (por ejemplo, 40 km/h, código de señal R-2-8), a la cual se le podría agregar una señal similar a la de código R-3-6 o R-3-7 para complementar la señal de reglamentación e indicar que la regulación aplica para ciertas condiciones, en este caso, ante las fuertes lluvias y alto oleaje.

En el caso de las señales preventivas, no existe en el manual de la SIECA (2014) una señal específica para estas condiciones, sin embargo, la DGIT podrá valorar la posibilidad de generar señales similares a la P-7-15 y P-7-16, las cuales se utilizan para indicar proximidad de un tramo de carretera con vientos fuertes; entre otras opciones por valorar.

8. VALORACIÓN DE RIESGO DE CONECTIVIDAD

Haciendo uso de los resultados obtenidos del IE-SC que indican las zonas de susceptibilidad costera y que podrían traducirse en una interrupción de paso, junto con las observaciones realizadas en las evaluaciones de campo, se hizo una adaptación a la valoración de riesgo de conectividad para el tramo entre el Roble y Caldera de la RN-23. Para esto, se consideraron zonas con riesgo de conectividad cerca del litoral.

Riesgo Potencial Alto Pk 4+500 – 5+000 y 9+000 a 10+500

Este riesgo se determina en la zona entre el estacionamiento del pk 5+000 hasta el pk 6+500 y entre el estacionamiento pk 9+000 a 11+500. El primer tramo incluye las aproximaciones y el puente sobre el río Barranca en la desembocadura. El segundo tramo es la zona donde se ha visto afectada la escollera de protección contra el oleaje. La RN-23 es una ruta de la Red de Alta Capacidad que comunica la Ruta Nacional N° 1 con la Ruta Nacional N° 27.

Riesgo Potencial Medio Pk5+000-6+500 y 10+500-11+500

Corresponde con el sector cercano al Puente de Barranca y el resto de la Ruta Nacional N°23 frente a la playa de Caldera y el estero de Mata de Limón.

Riesgo Potencial Bajo 1+500 – 4+000 y 8+500 a 9+000

Estas zonas corresponden con las partes más alejadas del mar, hacia el sector del Roble y también con las elevadas sobre el nivel del mar, específicamente en el sector de Roca Carballo.

9. CONCLUSIONES

El análisis geomorfológico histórico que se realizó en la zona de trabajo indica que esta es una zona dinámica y que la construcción de infraestructura cambió esa condición. La ubicación de una sección de la RN-23 sobre la duna de la playa es la principal razón por la que ese sector de la carretera se está viendo afectado actualmente.

Mediante la aplicación del Índice de Erosión y Sedimentación Costera (IE-SC) en el sector entre Caldera y el Roble, se pudo determinar de forma cuantitativa la susceptibilidad a la erosión costera que se está dando en este momento. Los resultados de la modelación son congruentes con las observaciones de campo para los sectores que presentan susceptibilidad muy alta y alta y que afectan la Ruta Nacional N°23.

Hay tramos de la Ruta Nacional N°23 que tienen una susceptibilidad muy alta y representan un riesgo potencial alto para la pérdida de conectividad, según la metodología empleada. Especialmente cerca de la desembocadura del río Barranca y en el sector donde se ubica la escollera entre el estacionamiento pk: 9+000 y 11+000.

El manejo de aguas superficiales en ese sector es muy importante y por lo tanto el mantenimiento que debe tener el canal de drenaje es esencial para proteger la RN-23.

Las obras de reconstrucción del enrocado que se están dando en el sector de Caldera, sirven para volver a proteger momentáneamente la Ruta Nacional N°23 del oleaje y mareas altas que se puedan dar en las condiciones actuales. Sin embargo, al no hacer ningún cambio que haga disminuir la exposición de la ruta, ese sector sigue presentando una susceptibilidad muy alta a la erosión costera y se ha reconstruido la vulnerabilidad.

Mientras no se tome una medida correctiva para solucionar el problema de fondo de erosión costera en el sector de Caldera, la vulnerabilidad de la infraestructura vial va a seguir presente.

Aunque ya se han visto efectos de la erosión costera en la Ruta Nacional N° 23, en este informe por primera vez se identificaron y cuantificaron las variables que propician la erosión y sedimentación aplicando el IE-SC.

10. RECOMENDACIONES

A continuación, se mencionan las recomendaciones a la Administración incluyendo las brindadas por LIMF en el año 2013 sobre la implementación de soluciones para disminuir el impacto de la erosión costera en el sector de Caldera:

1. Implementar las soluciones recomendadas por el LIMF en informe 2013. Específicamente LIMF recomienda implementar la opción 2 que consiste en construir 2 espigones extremos en la playa y encerrar el sector que presenta mayores problemas con dos espigones más, que lleguen hasta la batimétrica de 5 m, aportar aproximadamente 85,000.00 m³ de arena para hacer crecer la playa en ese sector del orden de los 30 m.
2. Reconectar lo antes posible la cámara web para poder dar monitoreo de forma remota a la zona más afectada por el oleaje en la RN-23.
3. Valorar la posibilidad realineamiento de la sección de la RN-23 ubicada entre km 10-11 que está con susceptibilidad muy alta, tomando en cuenta las limitaciones físicas debido al canal y el derecho de vía ferroviario, así como la reubicación de servicios públicos.
4. Limpiar el fondo del canal de drenaje y remover los sedimentos acumulados para evitar la acumulación de agua, para mejorar la condición hidráulica del canal y evitar mayores afectaciones a la población. Además, se recomienda el diseño y construcción de cunetas donde sea necesario para evitar la erosión de las vías marginales a la Ruta Nacional N° 23.
5. Proteger del terreno adyacente de la RN-23 para disminuir el impacto de la erosión. En general, para evitar problemas de erosión de la vía se recomienda el diseño y construcción

de un sistema de drenaje que maneje de forma controlada las aguas superficiales de este tramo de la vía y permita su desfogue controlado al canal de drenaje o al mar.

6. Atender las zonas de erosión que hay en el sector de la desembocadura del río Barranca para que no comprometa al puente que hay en esa zona.
7. Adicionalmente y como medida inmediata, se recomienda que se genere un protocolo de control en carretera para que, cada vez que se den las condiciones de fuerte oleaje generado por la conjunción de marea alta, tormentas en el océano con tren de olas de largo periodo (>18 segundos) y, pueda haber presencia de policías de tránsito en la zona, como figura de autoridad para un mejor control de las velocidades de los vehículos y atender cualquier percance que se presente. En casos que el alto riesgo debido al oleaje comience a impactar fuertemente el área de la calzada, los policías de tránsito podrán realizar un cierre total del tramo vial durante el lapso crítico del evento. Para ello, se deberá contar con los dispositivos de seguridad vial apropiados. La restricción de paso deberá también aplicar para los peatones y ciclistas circulando por las aceras y por la ciclovía existente, debido al riesgo de afectación directa a estos usuarios.
8. Se recomienda a la Administración informarse de las condiciones del oleaje de forma oportuna y utilizar continuamente los pronósticos locales de oleaje y viento del Módulo de Información Oceanográfica (MIO) del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) de la Universidad de Costa Rica: <http://www.miocimar.ucr.ac.cr/pronosticos-locales> y el pronóstico de oleaje local del MOPT e IMARES-UCR: <http://163.178.171.20>. Los pronósticos están acompañados de un sistema de cuatro niveles de precaución (celeste, verde, amarillo y rojo) siendo el rojo el escenario más severo. El uso de los pronósticos debería acompañarse de la revisión continua de las tomas de la cámara web del MIOCIMAR que transmite en vivo desde la zona donde se presentan los mayores problemas por oleaje en Caldera (<https://www.youtube.com/channel/UCm2hmTIK12e9d1QDaWAMLbg>).
9. Es altamente recomendable que la Administración valore establecer mecanismos más efectivos para disminuir el riesgo de ocurrencia de accidentes de tránsito producto de

estas condiciones severas, tal como la inversión en sistemas de alerta temprana que integren sistemas inteligentes de transporte. Uno de los componentes más efectivos es colocar vallas digitales informativas de mensaje variable en puntos estratégicos de la red vial en donde los usuarios tengan la posibilidad de optar por una ruta alterna, por ejemplo, antes del intercambio de Orotina entre la Ruta Nacional N° 27 y la Ruta Nacional N° 3, y antes del intercambio de Barranca, entre la Ruta Nacional N° 1 y la Ruta Nacional N° 23. A través de estas vallas controladas remotamente, se les informa a los usuarios en tiempo real para que opten por hacer cambios en su ruta para reducir riesgos, así como la posibilidad de que se realicen cierres totales temporales del tramo crítico mientras pasa el evento. Asimismo, las vallas digitales también son útiles en las inmediaciones del tramo crítico, con el fin de que los conductores puedan reducir su velocidad oportunamente y conducir con mayor precaución.

Para lo anterior, se sugiere como referencia lo que establece la Secretaría de Integración Económica de Centroamérica (SIECA), en su Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito. SIECA (2014)

Finalmente, el LanammeUCR considera importante informarles que el IMARES y MIOCIMAR cuenta con una aplicación gratuita de celular para obtener las advertencias y revisar los pronósticos de oleaje local de cada región del país, información que permite tomar medidas de manera oportuna.

11. REFERENCIAS

Alves, F.L., Coelho, C., Coelho, C. D., & Pinto, P., (2011): Modeling Coastal Vulnerabilities – Tool for Decision Support System at Inter-municipality Level. 966-970

Andrade, J. M. (1996): Análisis de la vulnerabilidad de la zona costera ante el ascenso del nivel del mar por un cambio climático global. Costa del Pacífico de Costa Rica. Informe final. Proyecto Centroamericano sobre Cambio Climático-Comité Regional de Recursos Hidráulicos. 34 pp.

Aragón E., (2019). Caracterización geológica de sitios susceptibles ante erosión costera en el tramo Carrillo-Ostional de la Ruta Nacional No. 160. Tesis de Lic.

Cárdenes, G., & Guillermo Obando, L. (2006). Índice de erosión-sedimentación costera (ie-sc): Una aplicación en la costa del Pacífico Central de Costa Rica. *Revista geológica De América Central*, 32. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i32.4243>

Gornitz, V.M., White, T.W. & Cushman, R.M., (1991): Vulnerability of the U.S. to future sea-level rise. In Proceedings of Seventh Symposium on Coastal and Ocean Management. Long Beach, CA, U.S.A. 2354-2368

LIMF, 2013: Dinámica Litoral y propuestas de actualización para la estabilización de Playa Caldera.

Lizano, O. 1997. Las mareas extraordinarias de (1997): en la costa del Pacífico de Costa Rica. - *Tóp. Meteor.Oceanogr.* 4: 169-179

Lizano, O.G., (2006): Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología.* 24, 51-64.

Lizano, O.G., (2007): Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología.* 25, 43-56.

Ortiz-Malavasi, E., 2012: Cambios geomorfológicos en el litoral Caribe y Pacífico de Costa Rica. Caso del Complejo Déltico de Sierpe. Instituto Tecnológico de Costa Rica-Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Ortiz-Malavasi, E., 2014: Atlas digital de Costa Rica - Instituto Tecnológico de Costa Rica [DVD-ROM].

Ruiz, P., Valverde, J., Rodríguez, N., & Naranjo, R., (2019): Erosión costera en el pacífico central de Costa Rica, implicaciones en la ruta nacional No.23, sección Caldera-el Roble. 3er Congreso Geológico UCR, San José, Costa Rica

Vindas, A., Valverde, J., Barrantes, R. & Ruiz, P., 2022: Cambios Espacio-Temporales en la morfología de la línea de costa del Océano Pacífico, implicaciones en la Ruta Nacional N°23, sección Caldera-El Roble, Puntares – Costa Rica. 6to Congreso Geológico UCR, San José Costa Rica