



Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad
Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria
Landscape management. Heritage, territory and city

TRABAJO FIN DE MÁSTER
MASTER-AMAIERAKO LANA
FINAL MASTER'S DISSERTATION

*ANÁLISIS DE DINÁMICAS
GRAVITACIONALES EN
ZONAS DEL ACANTILADO
COSTERO DEL GEOPARQUE
DE LA COSTA VASCA EN
ZUMAIA(GIPUZKOA)*

Autor: Jon Ander Clemente Momoitio

Directores: Tomás Morales Juberías y Jesús Ángel Uriarte Goti

2018/2019

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Leioa, 1 de Julio de 2019

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO.....	5
3. METODOLOGÍA.....	11
3.1. Información topográfica de detalle.....	11
3.2. Reconocimiento de inestabilidades: tipología de movimientos.....	13
3.3. Análisis de inestabilidades en los acantilados de la playa de Itzurun.....	14
3.3.1. Caracterización de discontinuidades e identificación de áreas fuentes.....	15
3.3.2. Análisis de trayectorias y alcance de elementos inestables.....	16
3.4. Simulación de caída de rocas.....	17
3.4.1. Simulación de caída de rocas en tres dimensiones (3D).....	17
3.4.2. Simulación de caída de rocas en dos dimensiones (2D).....	19
4. RESULTADOS.....	19
4.1. Sectorización general del área de estudio.....	19
4.2. Análisis de inestabilidades en los acantilados de la playa de Itzurun.....	22
4.3. Discontinuidades y desarrollo de inestabilidades: análisis cinemático.....	25
4.4. Características de los materiales caídos.....	28
4.5. Identificación de áreas fuente y trayectorias de desplazamientos.....	30
4.6. Modelización de procesos de caída de rocas en 2D y 3D.....	34
4.6.1. Zona A.....	34
4.6.2. Zona B.....	37
4.6.3. Zona C.....	39
4.6.4. Zona D.....	39
4.6.5. Zona E.....	39

4.6.6. Zona F.....	40
4.6.7. Zona G.....	42
4.6.8. Zona H.....	42
4.7. Resumen de datos.....	42
4.8. Recomendaciones.....	44
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	46
BIBLIOGRAFIA.....	49
Documentos oficiales.....	52
Referencias Web.....	53
Agradecimientos.....	53
ANEXOS	
ANEXO I. MODELOS TRIDIMENSIONALES, ALTITUD Y CUBICACIÓN DE LAS ZONAS B→H	
ANEXO II. ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS EN LA MODELIZACIÓN DE LAS ZONAS B→H	

1. INTRODUCCIÓN

El paisaje se define como cualquier parte del territorio tal como la percibe la población, cuyo carácter es el resultado de la acción y la interacción de factores naturales y/o humanos (**Convenio Europeo del Paisaje, 2000**). En estos términos, se puede considerar el paisaje como el más complejo y morfológicamente más extendido activo cultural (**Panizza y Piacente, 2008**).

La Geología, es uno de los factores principales que modelan y definen el paisaje. La distinta naturaleza de las rocas, las formas resultantes en el paisaje o la hidrogeología representan una parte importante de la geología como activo cultural y natural.

El Flysch de Zumaia (Gipuzkoa) es, en este sentido, uno de los puntos más singulares y a la vez representativos de la geología y geomorfología litoral. Los acantilados costeros son parte de la *Cultura Geomorfológica* (**Panizza y Piacente, 2003**) que aúna las características culturales y naturales del paisaje y sus interacciones con el patrimonio cultural de otras disciplinas, como la arqueología y la arquitectura. El concepto de *Cultura Geomorfológica* puede extenderse a todos los campos de las Ciencias de la Tierra y forma parte de la *Cultura Geológica*, que se relaciona con el concepto de *Geohistoria* (**Panizza y Piacente, 2003; Pralong, 2004**).

La singularidad del paisaje costero en el entorno de Zumaia, hizo que en el año 2010 se declarara **Geoparque** por la UNESCO. Fundamentalmente en base a sus espectaculares acantilados, modelados en materiales flyschoides que registran importantes cambios en la historia geológica de la Tierra (**Geoparkea, 2019**). Esta declaración, generó un importante incremento del turismo cultural en la zona que se suma al uso estival de las playas.

En todo caso, se trata de un entorno natural con una dinámica activa en la línea de costa, donde la acción del mar, principalmente oleaje y mareas, transforma continuamente el paisaje. **Los acantilados**, por su parte, evolucionan en el tiempo mediante procesos gravitacionales, con el desarrollo de distintas formas de inestabilidad, que dan lugar a la caída de rocas y materiales. Este último proceso es, en

la actualidad, un proceso muy común en todo tipo de taludes, naturales y construidos que genera un gran impacto económico y social (Erisman y Abele, 2002; Emmer, 2018).

Las caídas de rocas se relacionan con distintos mecanismos de inestabilidad, como desprendimientos, vuelcos, cuñas, roturas planares, pandeos y formas mixtas y complejas. Las áreas fuente de este tipo de inestabilidades están determinadas por la unión de condicionantes geológicos, geomorfológicos y medioambientales (Hernández-Gutierrez *et al.*, 2018), que también determinan la distribución espacial de caídas y su variabilidad temporal (Glade, 2003; Crosta y Agliardi, 2004; Michoud *et al.*, 2012; Frattini *et al.*, 2008, 2012).

En todo caso, el estudio de este tipo de procesos es complejo y, en la actualidad, las investigaciones se centran en la predicción espacial y temporal de sus dinámicas (Sarro *et al.*, 2018). Estos trabajos se han visto favorecidos por las mejoras en la modelización de caídas de rocas, que permiten utilizar los modelos tridimensionales generados a partir de vuelos de dron y obtener representaciones precisas de trayectorias individualizadas (Bourrier *et al.*, 2013).

En este contexto, el **objetivo** principal de este trabajo es la realización de un análisis de las inestabilidades que afectan a los acantilados del entorno de las playas de Itzurun y Algorri, en el marco del Geoparque de la Costa Vasca, y su posible **incidencia en los usos** de estos espacios.

Ello implica, a mayor escala, el desarrollo de los siguientes objetivos parciales:

- **Caracterización** de materiales geológicos y dinámicas gravitacionales asociadas.
- **Sectorización** de la zona de estudio en función de la tipología de inestabilidades reconocidas, grado de desarrollo y dinámica, en un contexto de usos de los espacios considerados.

A escala de detalle, el estudio busca avanzar en el sector de mayor uso, que corresponde con la playa de Itzurun y sus accesos. En este caso, el objetivo es analizar el alcance de elementos potencialmente inestables y la propuesta de actuaciones estratégicas de gestión. Este trabajo incluye los siguientes apartados:

- **Identificación** de áreas fuente por zonas, trayectorias de caída de rocas y alcance.

- **Análisis** dinámico de los procesos observados mediante simulación con programas específicos de caída de rocas, en 2 y 3 dimensiones.
- **Reconocimiento** de las problemáticas asociadas a cada sector, análisis de energía y avance de actuaciones recomendadas, incluyendo la consideración de barreras dinámicas y limitaciones de uso, en función de la naturaleza y actividades desarrolladas en cada sector.

2. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

El área de estudio se localiza en la zona oriental de la cornisa cantábrica, en terrenos correspondientes al municipio de Zumaia, que forma parte del territorio de Gipuzkoa (Figura 1).

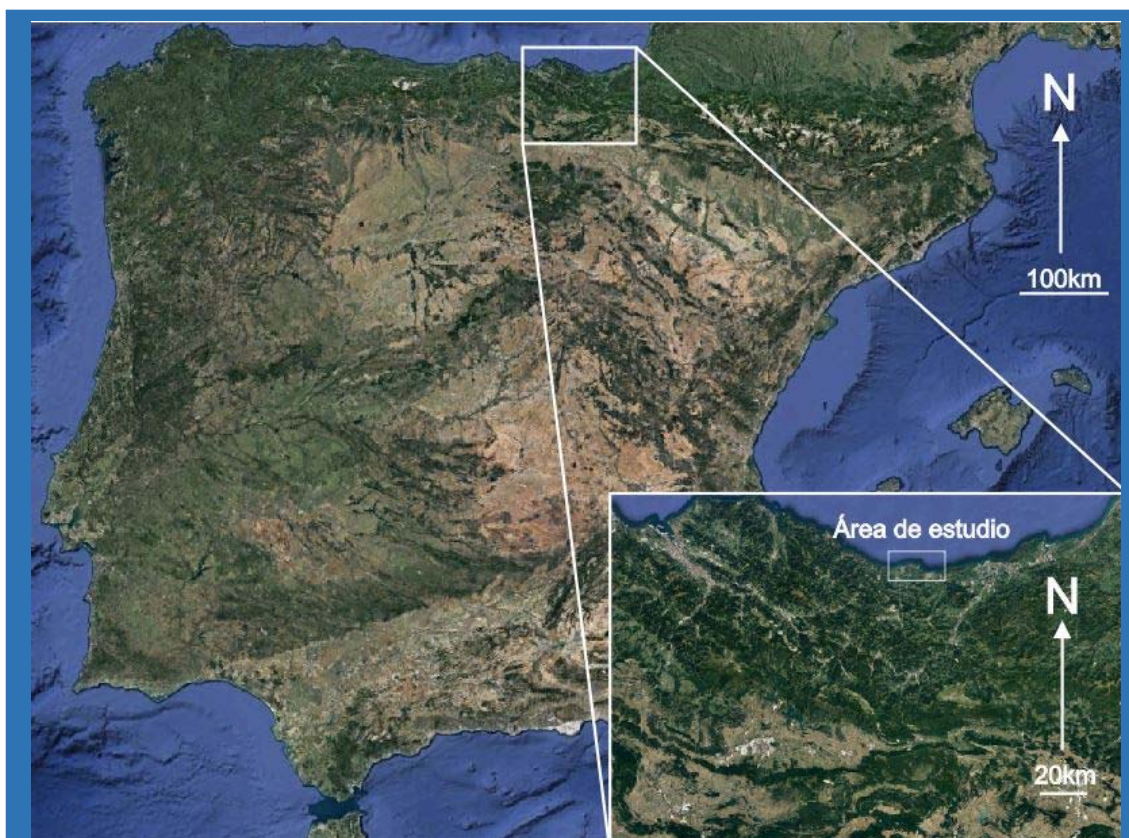


Figura 1. Ubicación del área de estudio, en la Península Ibérica (Modificado de Google Maps, 2019)

Como ya se ha adelantado en la introducción, el trabajo se centra en el entorno de la playa de Itzurun, desde la Punta Mariantón, al NE, hasta la playa de Algorri, de menor dimensión, al W de Itzurun (Figura 2). Presenta en conjunto un recorrido de 1,8

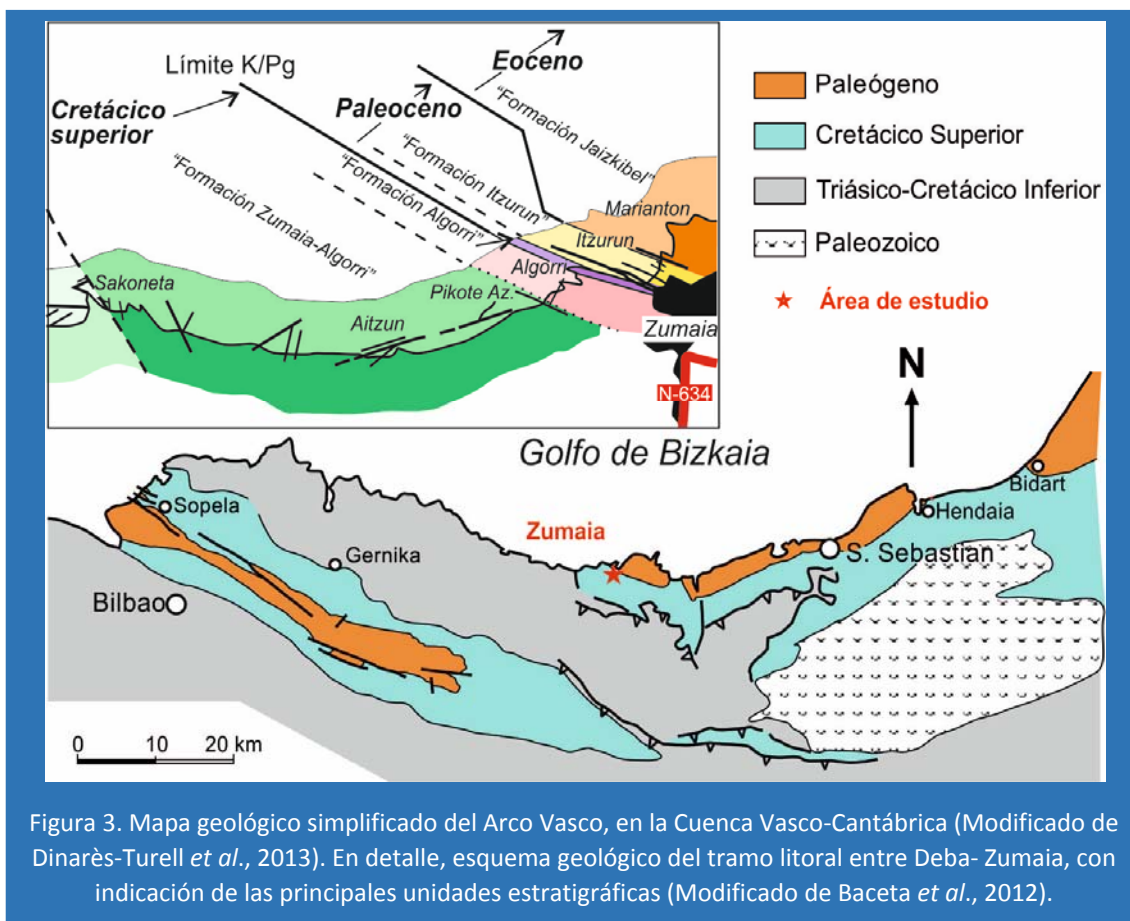
kilómetros a lo largo de la línea de costa (Figura 2). Ambas playas forman parte del denominado dominio público marino-terrestre (Orden Ministerial, 2001). Además, pertenecen al Biotopo protegido del litoral Deba-Zumaia, declarado así por el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales del año 2009, lo que favorece la protección de esta franja litoral (Decreto 34/2009, BOPV). Actualmente, con motivaciones geoturísticas, visitan el lugar más de 120.000 personas a lo largo del año, y se han abierto al menos una decena de negocios en relación con el Flysch. A este número hay que sumar el turismo de verano que ocupa principalmente la playa de Itzurun (Plan de Turismo de Zumaia, 2018).



Figura 2. Foto aérea del área de estudio (Modificado de Google Maps, 2019)

En cuanto al contexto geológico, en la zona de estudio se localizan los principales afloramientos del denominado Flysch Deba- Zumaia que se desarrolla entre el Albiense y el Eoceno (Baceta *et al.*, 2012). Forma parte del “Flysch de la Costa Vasca”, en la rama occidental del Arco Vasco, dentro de la Cuenca Vasco-Cantábrica (Figura 3).

Se conoce como Flysch a un conjunto de rocas sedimentarias formadas por estratos plano-paralelos, con una gran continuidad lateral que se habrían depositado en ambientes marinos profundos (entre 1000 y 5000 m) y se caracterizan por presentar una estratificación persistente y muy bien definida (Pettijohn & Potter, 1964).



La sucesión de estos materiales, en la zona de Zumaia estudiada, presenta un registro prácticamente continuo de la sedimentación que ocurrió en los fondos marinos antiguos entre el Maastrichtiense, que comenzó hace 72 millones de años (m.a.) y el Ypresiense, que se inicia hace 56 m.a. (Figura 4).

Los materiales más antiguos de la sección, maastrichtienses, se sitúan al SW de la zona de trabajo, y corresponden a la denominada Formación Zumaia-Algorri (Mathey, 1982). El muro de esta formación está constituido por una alternancia de calizas, margas hemipelágicas y lutitas, denominadas comúnmente “flysch calcáreo”. Su techo lo forman una sucesión de margas y margocalizas compactas, de coloraciones rojizas y eventualmente grises, ordenadas en capas alternantes de 15 a 20 centímetros de espesor. En algunas secciones, estos depósitos incluyen intercalaciones de turbiditas de espesor centimétrico (Baceta *et al.*, 2005).

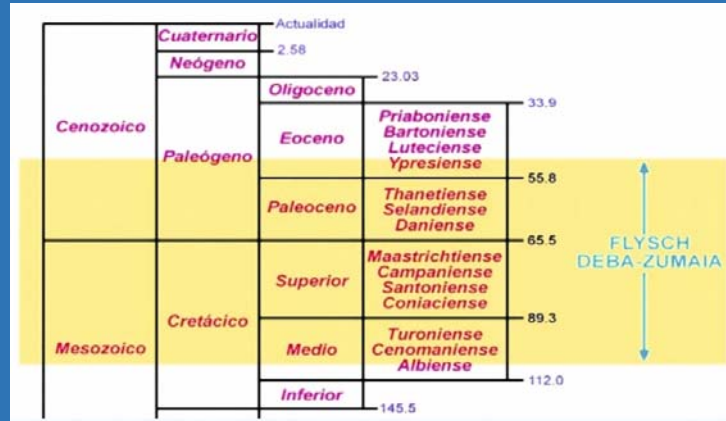


Figura 4. Tabla simplificada de los tiempos geológicos, indicando el intervalo temporal que representa el Flysch Deba-Zumaia (Modificado de Baceta *et al.*, 2012).

En la playa de Algorri, se encuentra el límite entre la Formación Zumaia-Algorri (Cretácico) y la Formación Algorri del Paleógeno (Figura 5), comúnmente conocido como límite K/Pg (Cretácico/Paleógeno). Este límite representa la extinción masiva que tuvo lugar en el tránsito Cretácico-Paleógeno, debida al impacto de un asteroide hace 66 m.a. (Álvarez *et al.*, 1980).



Figura 5. Límite Cretácico/Paleógeno (K/Pg) de la playa de Algorri, Zumaia.

El inicio del Paleógeno lo marcan los materiales del Daniense de la Formación Algorri, que está constituida por una serie de calizas rosadas estratificadas, de potencia centimétrica a decimétrica. Hacia techo, evolucionan progresivamente a facies de margas, margocalizas y eventuales areniscas, que marcan la base de la Formación Itzurun, constituida por materiales desde el Selandiense hasta el Eoceno. Este límite es conocido como el límite Daniense/Selandiense y se asocia a una caída del nivel del mar (Orue-Etxebarria *et al.*, 2007).

En los materiales del Selandiense, las litologías son calizas, margas y margocalizas. Su techo: límite Selandiense/Thanetiense, no presenta un cambio de litología como el límite anterior, pero sí se registra una inversión en el campo magnético de la Tierra, recogido en estudios magnetoestratigráficos (Pujalte *et al.*, 1995).

La Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS) en primera instancia y, finalmente, la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) han ratificado recientemente el acuerdo adoptado por el Grupo de Trabajo del Paleoceno, según el cual la sección que aflora en la playa de Itzurun de Zumaia ha sido seleccionada como el lugar de referencia mundial (*Global Boundary Stratotype Section and Point*, abreviado GSSP) para los límites internos del periodo Paleoceno: Daniense/Selandiense y Selandiense/Thanetiense (Figura 6), ambos condecorados con el *Golden Spike* o clavo de oro (Orue-Etxebarria *et al.*, 2007).

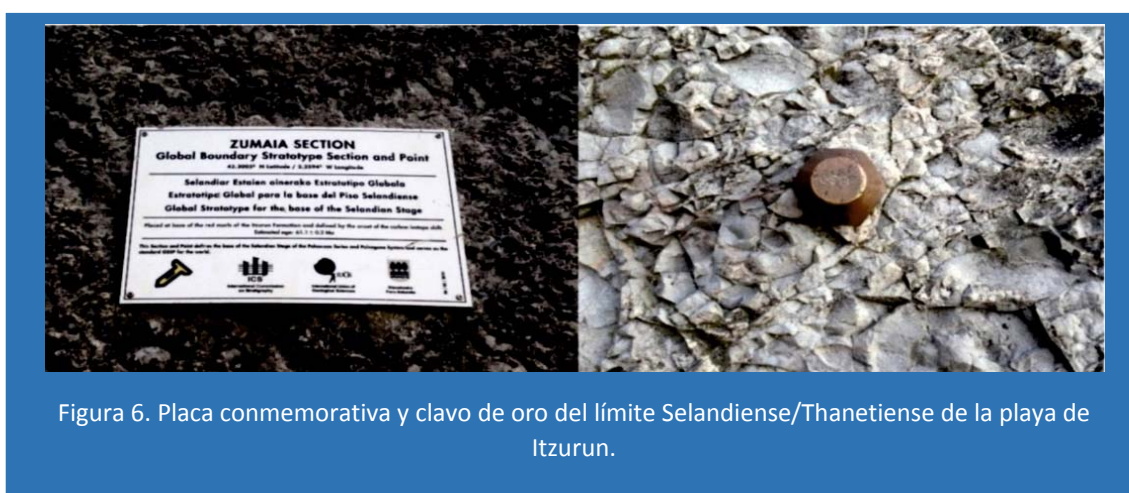


Figura 6. Placa conmemorativa y clavo de oro del límite Selandiense/Thanetiense de la playa de Itzurun.

Los materiales del Thanetiense están constituidos por una alternancia de calizas, margas y margocalizas hemipelágicas, con intercalaciones turbidíticas de tamaño centimétrico. Su techo, marcado por un nivel de lutitas rojas que representa un cambio

paleontológico de entidad, marca el límite Paleoceno- Eoceno, con la extinción de los foraminíferos bentónicos de aguas profundas y la renovación del plancton calcáreo (Orue-Etxebarria *et al.*, 2004) (Figura 7). Además de la variación paleontológica, a partir de este límite se registra un cambio litológico brusco, con la evolución de las facies carbonatadas del Paleoceno hacia las facies siliciclásticas del Eoceno.



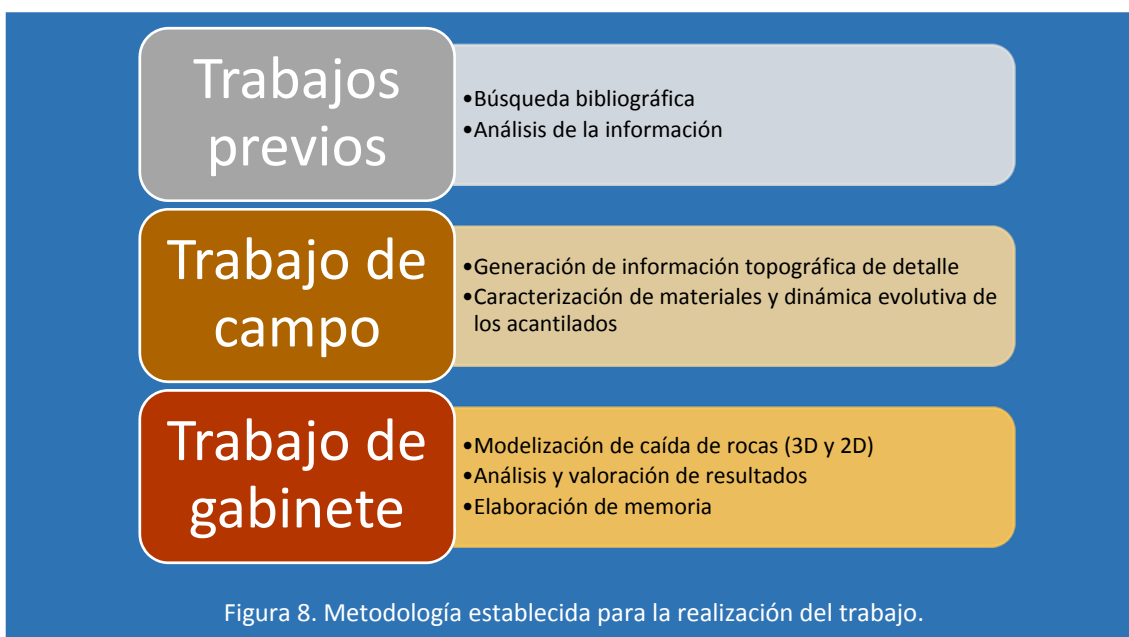
Figura 7. Límite Paleoceno/Eoceno de la playa de Itzurun.

La base del Eoceno, está representada por una alternancia de lutitas y areniscas, que es conocida como flysch arenoso del Eoceno o Formación Jaizkibel. Esta formación es la unidad más joven del Flysch, de edad Ypresiense (Baceta *et al.*, 2012). La ya indicada evolución de rocas carbonatadas a siliciclásticas está originada por el aumento de corrientes de turbidez que se depositaban en el fondo marino, relacionadas con la actividad de la Orogenia Alpina. En este sentido durante el Eoceno (40-45 m.a.) se desarrolló en la Península Ibérica una fase compresiva, en la que la placa africana tuvo un desplazamiento general hacia el norte. Esta compresión fue la precursora de la creación de las Cordilleras Béticas al sur y de los Pirineos al norte. Influenciados por estos movimientos tectónicos, los materiales del Flysch emergen para formar la base del paisaje actual (Arz *et al.*, 1992).

La disposición de estas sucesiones flyschoides oblicua a la costa y la dinámica litoral, en un entorno de cambios de nivel de base notables en los últimos tiempos geológicos (Pedoja et al., 2014) conforman un paisaje en el que los acantilados de alturas de entre 30 y 70 metros resaltan sobre una línea de costa dominada por las rasas actuales. En zonas protegidas de la acción del oleaje y corrientes marinas, se desarrollan las playas que conforman entornos singulares (Bird, 2000). La más importante en la zona de estudio es, precisamente, la playa de Itzurun. Su ubicación, en la base de los acantilados hace que el desarrollo de procesos gravitacionales, particularmente caída de rocas, pueda afectar a los usos fundamentalmente recreativos de este entorno, por lo que su análisis constituye un elemento prioritario para una gestión apropiada.

3. METODOLOGÍA

El trabajo realizado incluye, además de la oportuna revisión bibliográfica, los trabajos de campo y gabinete que se detallan a continuación (Figura 8).



3.1. Información topográfica de detalle

La primera fase del trabajo de campo consistió en la obtención de una imagen del terreno, mediante el uso de un dron (Figura 9.a) o Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) modelo Mavyc Pro de la compañía DJIAir. El vuelo se realizó a una altura de 40 metros sobre el punto de salida, a unos 80 metros sobre el nivel del mar. El vuelo realizado es un SFM (*Structure From Motion*) en modo estructural, una técnica altamente

empleada en el campo de las geociencias que permite obtener datos de alta resolución, capaz de representar un objeto 2D a 3D con una serie de fotografías desde diferentes puntos de vista (Tomás *et al.*, 2016). El vuelo tuvo una duración de 12 minutos y medio, donde se cubrieron 2 hectáreas con 200 imágenes. La velocidad de vuelo fue de 5 m/s y la superposición de imágenes tanto frontal como lateral del 70%, lo que permite que cada zona del modelo esté representada en al menos dos imágenes.



Figura 9. a) Dron utilizado en el trabajo de campo; b) Estación fija de GPS; c) Estación móvil de GPS.

Toda la información generada se ha georreferenciado, con el fin de estandarizarla y facilitar su utilización en combinación con información generada con anterioridad en otros proyectos. Para ello se ha utilizado un sistema GPS diferencial de la marca EMLID Reach RS+ que funciona en RTK (*Real Time Kinematic*), una técnica usada para topografía, donde una sola estación de referencia proporciona correcciones en tiempo real, obteniendo una exactitud submétrica. En el caso del proyecto realizado, es compatible con la red GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Se ha utilizado una estación base (Figura 9.b) y una móvil (Figura 9.c) en comunicación continua, para una precisión milimétrica.

El tratamiento de la información obtenida con el dron permite generar los siguientes documentos de base:

- Un Modelo Digital del Terreno (MDT) de detalle del área de estudio, que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, como, por ejemplo, la cota del terreno. El MDT representa la superficie del suelo desnudo y sin ningún objeto, como la vegetación o los edificios. El modelo generado servirá de base para la obtención de las nubes de puntos tridimensionales y la cartografía de detalle.

- Una nube de puntos tridimensional (3DPC), que es un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional, que representan la superficie externa del objeto. Las nubes permitirán generar los modelos tridimensionales, a partir de los que se realizarán las simulaciones de caídas de rocas (**Figura 10**).
- Una cartografía de detalle, con una resolución de 20 centímetros, que servirá de base para el resto de trabajos de campo y la representación de información.



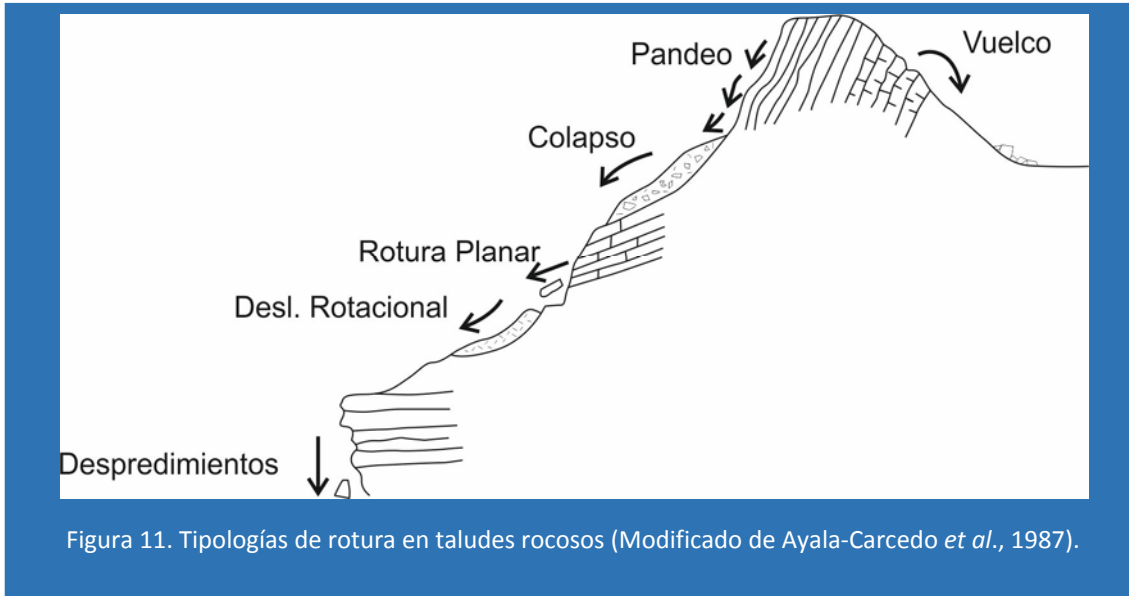
Figura 10. Nube de puntos tridimensional de una zona de la playa de Itzurun. Visualización a partir del programa de modelado 3D CloudCompare.

3.2. Reconocimiento de Inestabilidades: tipología de movimientos

La identificación de elementos inestables se aborda, en primer lugar, a partir de observaciones de campo. Los tipos de movimiento principales han sido establecidos de acuerdo con los criterios definidos en (Ayala-Carcedo *et al.*, 1987) (**Figura 11**).

Deslizamientos traslacionales. Se desarrollan sobre una superficie plana (rotura planar) o la combinación de dos superficies oblicuas (rotura en cuña). Son las formas de roturas más habituales en macizo rocoso, controladas por la red de discontinuidades. Generalmente este tipo de movimientos se desarrollan de forma rápida.

Talud infinito o indefinido. Se desarrolla sobre una base fundamentalmente plana subparalela a la superficie del terreno. El material inestable es una capa de espesor relativamente constante y pequeño respecto a la altura del talud.



Los vuelcos o *toppling*. Implican una rotación de unidades con forma de columna o bloque sobre una base, bajo la acción de la gravedad y fuerzas ejercidas por unidades adyacentes. Son procesos de baja recurrencia, pero de gran velocidad una vez activos.

El **pandeo** (o *buckling*). Aparece cuando la estratificación es subvertical y existe gran diferencia, entre al menos dos de las tres dimensiones que definen geoméricamente la estructura. Si existe una serie de diaclasas subortogonales a la estratificación, pueden producirse pandeos por flexión de placas fracturadas. Son procesos de baja recurrencia, con una alta velocidad cuando son activos.

El **deslizamiento rotacional**. Tiene lugar a lo largo de una superficie de deslizamiento interna, de forma aproximadamente circular y cóncava. Se relaciona habitualmente con macizos rocosos muy fracturados o meteorizados. La velocidad de estos movimientos varía dependiendo del entorno.

3.3. Análisis de inestabilidades en los acantilados de la playa de Itzurun

En los acantilados que delimitan la playa de Itzurun, los procesos de inestabilidad dan lugar al desprendimiento de bloques sobre un entorno de gran uso recreativo y cultural.

En este caso, se ha procedido al análisis de caída de rocas o desprendimientos, buscando reconocer el proceso de inestabilidad en su totalidad, que incluye la identificación del origen de los elementos inestables, el reconocimiento

individualizado de su evolución y sus efectos a pie de talud, lo que permitirá recomendar las oportunas estrategias de gestión.

3.3.1. Caracterización de discontinuidades e identificación de áreas fuente

Las áreas fuente representan el origen del proceso de caída de rocas. Son los entornos desde los que, a favor de los planos de discontinuidad, se liberan rocas del acantilado costero que descienden gravitacionalmente por el talud (Figura 12).

En esta fase, se realizan dos labores fundamentales: la caracterización de la red de discontinuidades que afecta al macizo y la identificación “in situ” de las áreas fuente de elementos inestables.

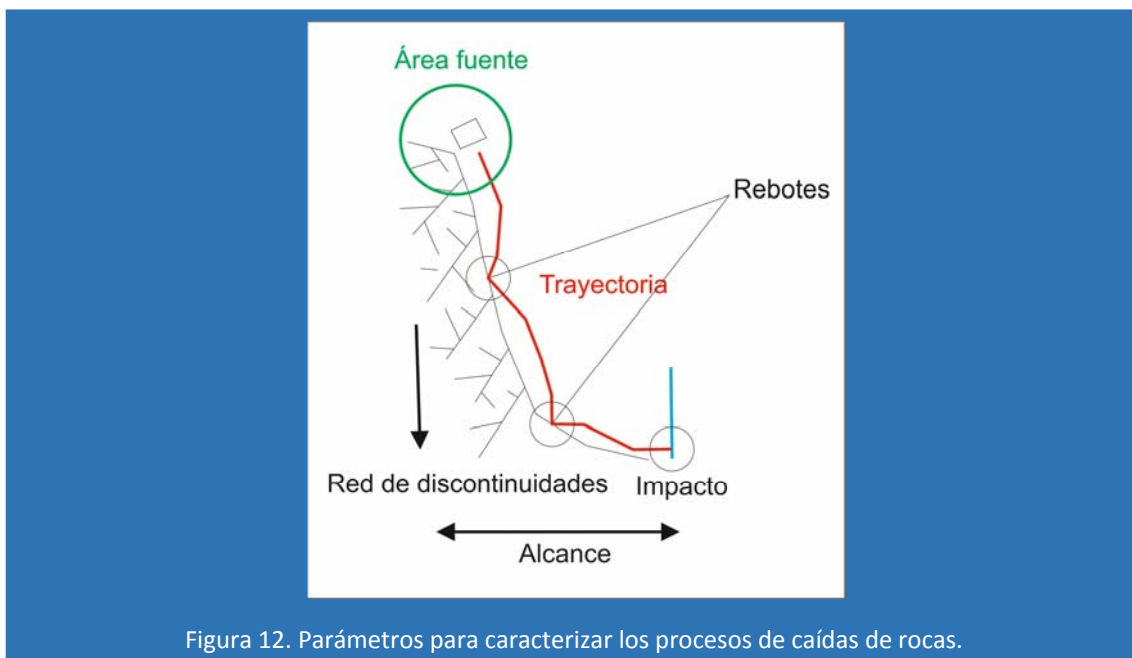


Figura 12. Parámetros para caracterizar los procesos de caídas de rocas.

Como ya se ha indicado, uno de los principales condicionantes de la caída de rocas es la red de discontinuidades del macizo. Esta red da lugar a una estructura de planos de debilidad que determina la forma y el tamaño de los elementos inestables. Además, su orientación respecto a los acantilados, determina la dinámica de las inestabilidades.

Para la caracterización de la red de discontinuidades, la medida de planos de discontinuidad se ha realizado con una brújula Topochaix (Figura 13). A partir de estas medidas, se establecen las distintas familias de discontinuidad del talud, y se realiza un análisis cinemático de inestabilidades potenciales por proyección estereográfica en falsilla de Schmidt mediante el programa Dips.v.6.0.

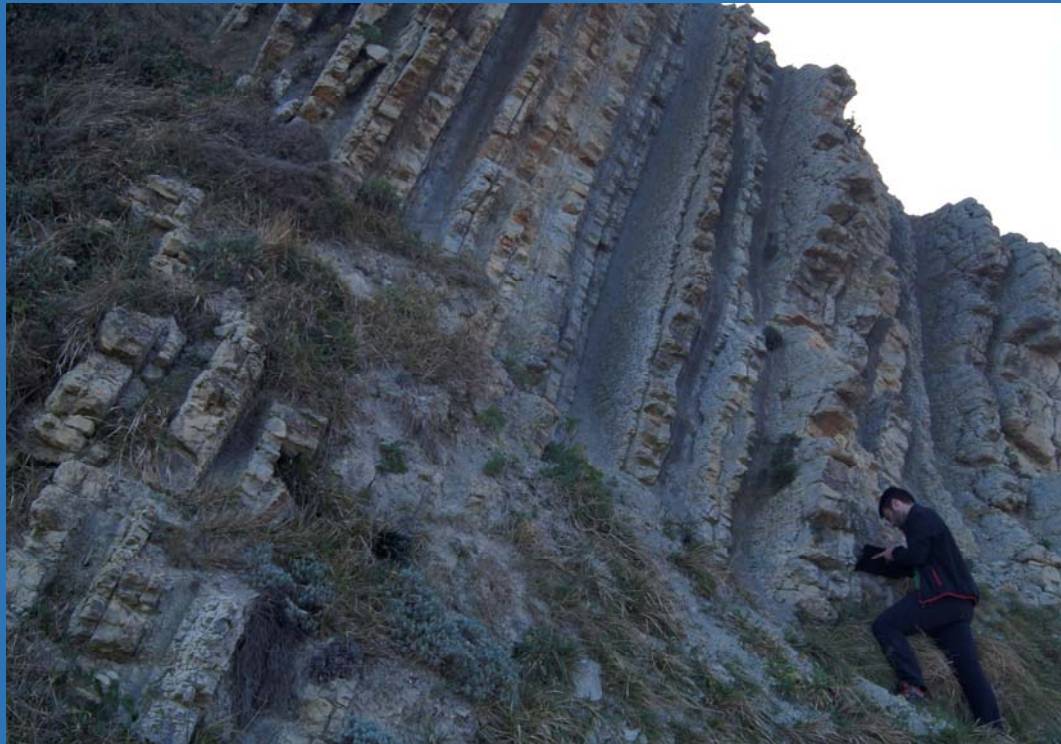


Figura 13. Medida de planos de discontinuidad realizadas en el trabajo de campo.

3.3.2. Análisis de trayectorias y alcance de elementos inestables

Una vez definido el origen del proceso, se identifican en campo las trayectorias de las rocas, evaluando las evidencias de sus desplazamientos desde el punto inicial hasta el lugar en el que se detienen a pie de talud (Figura 12). En este recorrido, resulta fundamental caracterizar los rebotes de las rocas, que están condicionados por la naturaleza del terreno; por ello, se han reconocido las características y materiales de los acantilados y del pie de los mismos.

Tras el análisis del proceso a lo largo del talud, se obtiene información de las consecuencias del proceso a pie del mismo.

En primer lugar, se marca la posición de los elementos caídos y se establece la distancia máxima que recorre la roca desde el área fuente hasta que se detiene. Ello permite una primera delimitación de las zonas de actividad de este proceso en el área de estudio (Figura 12).

A continuación, se estudian los impactos de las rocas a pie de talud, evaluando las afecciones en la zona (Figura 12).

En este apartado, se ha realizado un estudio específico de los bloques caídos, que incluye la determinación de su peso y morfología. Para ello, se han utilizado dos dinamómetros KAMER (Figura 14), uno para rocas de hasta 25 kilogramos, con un rango de precisión de +/- 20 gr, y el otro hasta 150 kilogramos, con un rango de precisión de +/- 100 gr. El dimensionado de las rocas se ha realizado con una cinta métrica que el mismo dinamómetro incorpora. Las medidas de peso y dimensiones se han realizado en las rocas que se encuentran a pie de talud, determinando el número de rocas medidas y las zonas de influencia.



Figura 14. Dinamómetros utilizados en el trabajo de campo.

3.4. Simulación de caídas de rocas

Se han realizado simulaciones de caídas de rocas en dos y tres dimensiones.

3.4.1. Simulación de caídas de rocas en tres dimensiones (3D)

La simulación 3D de caídas de rocas se ha realizado mediante el *software* RocPro3D. Este software realiza simulaciones de trayectorias individualizadas para cada roca, desde un área fuente definida y con unos parámetros de rocas específicos.

Para la realización de simulaciones, el programa necesita una nube de puntos tridimensional. Mediante la nube obtenida en la metodología de este trabajo, se realiza con el mismo software una triangulación para crear una malla tridimensional. Esta malla es la base sobre la que se representarán los datos recogidos previamente en el trabajo de campo.

Por un lado, se determinan las condiciones del proceso de caída de rocas, como el número y ubicación de las áreas fuente, el número de caídas de rocas o la naturaleza

del terreno. Por otro lado, se incluyen los parámetros de las rocas a simular, definiendo su peso y su morfología.

La naturaleza del terreno condiciona la evolución de los elementos inestables, por lo que para cada tipo de terreno diferenciado se ajustan los oportunos parámetros de rebote, que son:

- Coeficiente de restitución normal o RN: es una medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas clásicas (Burbano de Ercilla, 2003). Cuanto mayor es el Coeficiente, mayor es el rebote de las rocas al golpear.
- Coeficiente de restitución tangencial o RT: es una medida del grado de conservación de la energía potencial en un choque entre partículas clásicas (Burbano de Ercilla, 2003). Al aumentar este coeficiente, aumenta el rebote de las rocas al golpear.
- El ángulo de fricción: es una propiedad de los materiales granulares que relaciona el ángulo de reposo o máximo ángulo estable posible para el valor de pendiente de conjunto de dicho material granular (Bustabad-Rey, 1980).

En nuestro caso, se han considerado tres tipos de terreno en el área de estudio: el primero representa los afloramientos rocosos de los acantilados costeros, definido como “Flysch”; el segundo lo formaría la zona antropizada de la zona de estudio, definido como “Camino”; el tercero y último, representaría la zona de la arena, definido como “Playa”.

Establecido el modelo y el proceso de caída de rocas, se realiza la simulación, obteniendo las trayectorias y energías para cada roca de manera individualizada. Del mismo modo, el *software* representa la información obtenida a lo largo del perfil y gráficamente, lo que permite comparar los puntos de mayor y menor energía a lo largo del trayecto.

Puesto que se puede analizar cada trayectoria de manera individual, se determina también su alcance e impactos en el modelo, pudiendo realizar una comparación entre la simulación y la realidad.

3.4.2. Simulación de caídas de rocas en dos dimensiones (2D)

Las simulaciones bidimensionales se han realizado con el *software* RocFall. Este software permite a partir de la definición previa de un perfil, realizar simulaciones de caídas de rocas de manera individualizada. Para la obtención de los perfiles topográficos de la zona de estudio, se han utilizado los generados previamente por el *software* RocPro3D.

Para la obtención de los perfiles, se ha realizado un diseño idéntico al original utilizando el programa de diseño gráfico CorelDraw.

Al igual que la simulación 3D, el software requiere la definición de los siguientes parámetros para su funcionamiento: áreas fuente, número de rocas a analizar y parámetros de rebote de cada tipo de terreno.

De este modo, se obtiene la energía y trayectoria de las rocas de manera individualizada a lo largo del perfil, pudiendo realizar una comparativa con las observaciones de campo.

La principal ventaja de este modelo es que permite, para cada trayectoria analizada, variar el perfil topográfico y observar sus consecuencias en la evolución de materiales.

4. RESULTADOS

A escala general, el trabajo realizado permite diferenciar distintos sectores en la zona de estudio, en función de su dinámica evolutiva, tipología de inestabilidades observadas y usos. A escala de detalle, el trabajo en los acantilados que bordean la playa de Itzurun permite avanzar en el análisis de inestabilidades y caída de rocas: origen, trayectoria, consecuencias y recomendaciones.

4.1. Sectorización general del área de estudio

La zona comprendida entre la Punta Mariantón (NE) y la playa de Algorri puede ser dividida en los siguientes 5 sectores ([Figura 15.a](#)):

Sector 1. Se encuentra al NE del área de estudio. Se inicia en la Punta Mariantón y termina al comienzo de la playa de arena de Itzurun ([Figura 15.a](#)). En esta zona los acantilados costeros se elevan sobre una rasa mareal que limita el uso estival de este

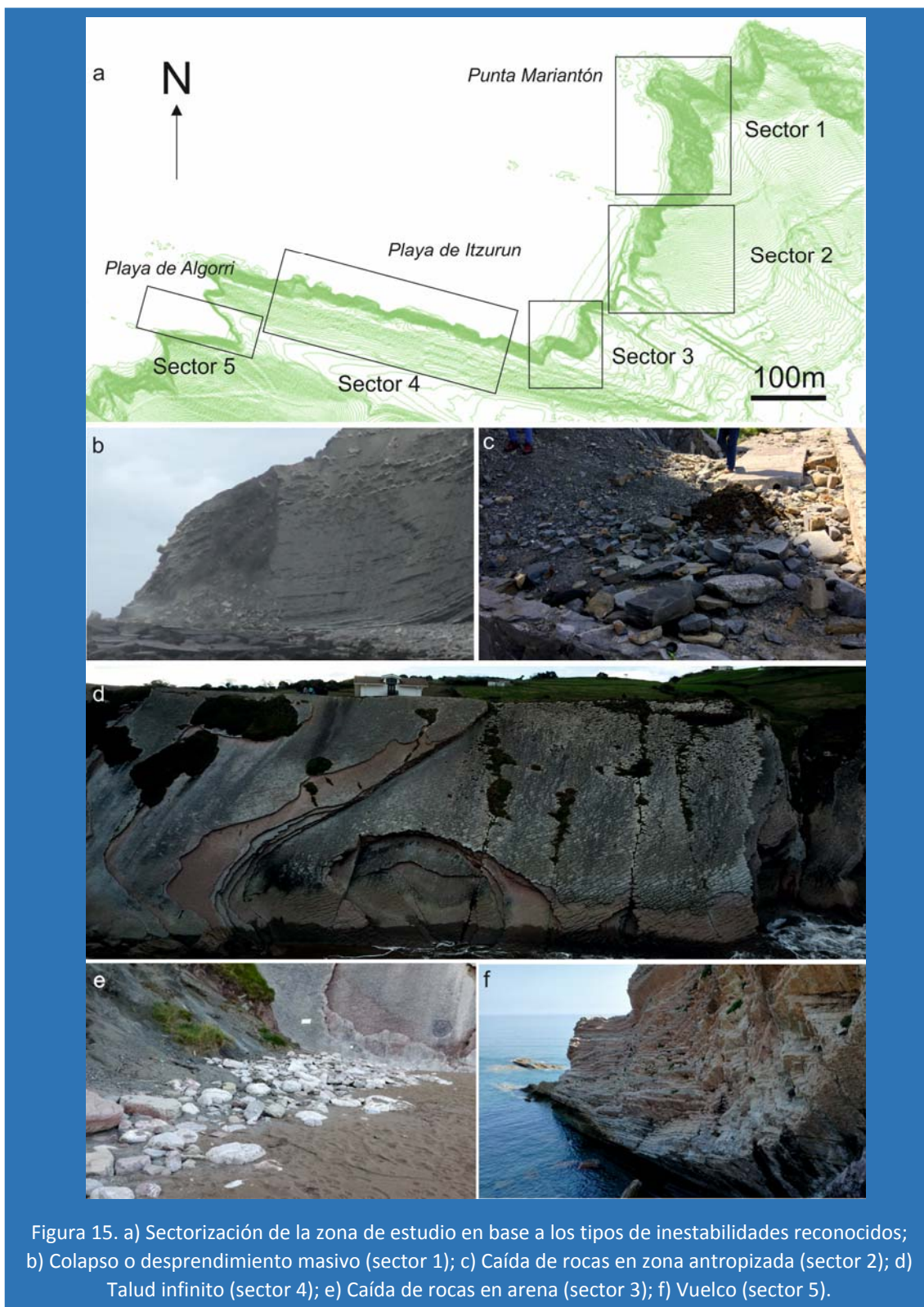
espacio y atrae fundamentalmente a visitantes interesados en aspectos geológicos y paisajísticos. Su uso es por tanto limitado. En lo que se refiere a la dinámica de los acantilados, hay registro de un desprendimiento masivo relativamente reciente (Figura 15.b, imagen cedida por Asier Hilario, Geoparkea). El tiempo de recurrencia de este proceso es bajo, aunque una vez activado, el proceso es de una entidad y velocidad altos, pudiendo causar graves daños en apenas unos minutos. Igualmente llamativos son los procesos gravitacionales asociados a dos niveles areniscosos de potencia métrica, que se desarrollan en un dominio eminentemente arcilloso, en la mitad noreste de este sector. Hacia el suroeste, la alternancia de materiales de mayor y menor competencia es más homogénea, y las inestabilidades se relacionan en general con elementos rocosos de dimensiones limitadas.

Sector 2. Inmediatamente al sur del anterior, el sector 2 corresponde al tramo más antropizado de la playa de Itzurun. Se trata de una playa de arena en la que se concentra buena parte del turismo estival. Es, además, la zona de acceso tanto a la playa como a los sectores adyacentes en momentos de marea baja. En este sector se han detectado numerosas caídas de rocas y periódicamente se realizan saneos y limpiezas en los taludes para controlar y, en su medida, evitar daños a las estructuras y a los visitantes (Figura 15.c). Estos procesos suelen ser de caída de rocas de tamaño limitado, rápidas, individualizadas o en pequeños grupos.

Sector 3. Corresponde con el tramo de playa menos antropizado. En este sector, la arena de playa llega hasta la base de los acantilados, lo que favorece su utilización por parte del turismo más estival, además del que se aproxima a la zona con un objetivo más cultural. Sus acantilados presentan una dinámica similar a los del sector anterior, pero en este caso, los materiales desprendidos alcanzan directamente a la playa (Figura 15.e).

Sector 4. Constituido por el acantilado situado entre la playa de Itzurun y Algorri. Se trata de unos acantilados de desarrollo espectacular marcados por la presencia de arcos de grandes dimensiones, que forman parte de una de las imágenes más características del Geoparke. En este sector, la orientación de los estratos es paralela a la línea de costa, a diferencia de los sectores previos, que presentaban una orientación prácticamente perpendicular. No se registra una caída de rocas tan continua como en

los sectores previos, particularmente el 2 y el 3, y las posibles inestabilidades del tipo talud infinito o indefinido, pueden llegar a tener grandes dimensiones (Figura 15.d). Se trataría en todo caso de un proceso de baja recurrencia, que se vería favorecido por la acción erosiva del mar al pie de los acantilados.



Sector 5. Corresponde con la playa de Algorri. Se trata en todo caso de una playa de pequeñas dimensiones con un limitado uso por turismo estival. Por el contrario, el hecho de localizarse en este sector el límite K/Pg hace que sea uno de los puntos de mayor interés geológico-cultural, que atrae un turismo notable que concentra una parte importante de las actividades didácticas del Geoparque. Los estratos siguen orientados paralelamente a la línea de costa como en el sector anterior. Esto hace que se desarrollen dos situaciones dinámicas bien diferenciadas a ambos lados de la playa. Al norte, donde se sitúa el nivel de tránsito, la meteorización diferencial de los materiales menos resistentes que han generado la playa, da lugar a un dispositivo favorable al desarrollo de vuelcos. En cambio, en el suroeste, la misma orientación de los estratos favorecen procesos de inestabilidad de tipo talud infinito similares a los descritos en la anterior zona (Figura 15.f).

4.2. Análisis de inestabilidades en los acantilados de la playa de Itzurun

Tras la sectorización de conjunto del área, el trabajo se ha centrado en el análisis en detalle de la problemática de caída de rocas en los sectores 2 y 3 de la playa de Itzurun, dado que son las zonas de mayor uso del área de estudio. En todo caso, dado que las nubes de puntos utilizadas son muy densas y no permiten una modelización de conjunto, se ha realizado una zonificación que tiene en cuenta, además, diferencias de dinámicas y de contexto a lo largo de los acantilados.

Así, los acantilados de borde de la playa de Itzurun se han dividido en 8 zonas consecutivas, que son, de noreste a suroeste (Figura 16):

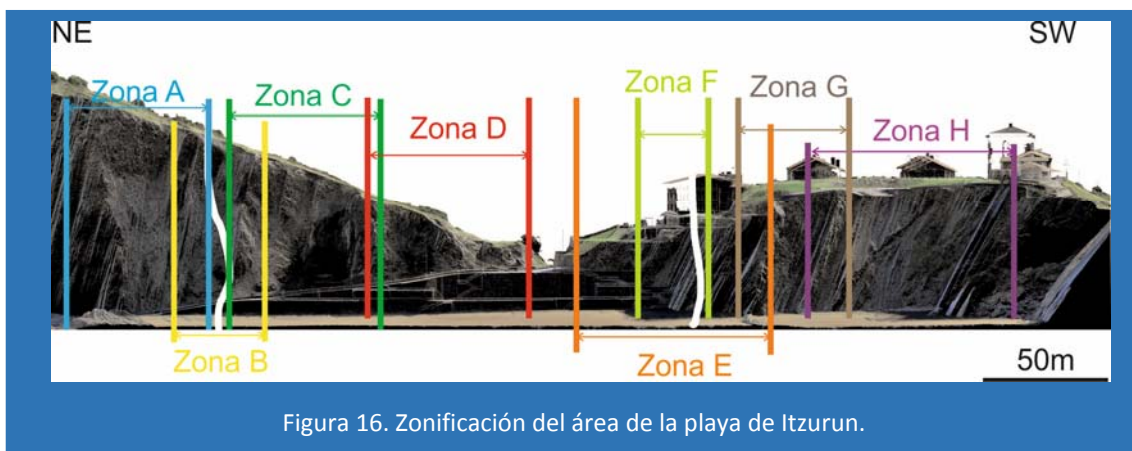


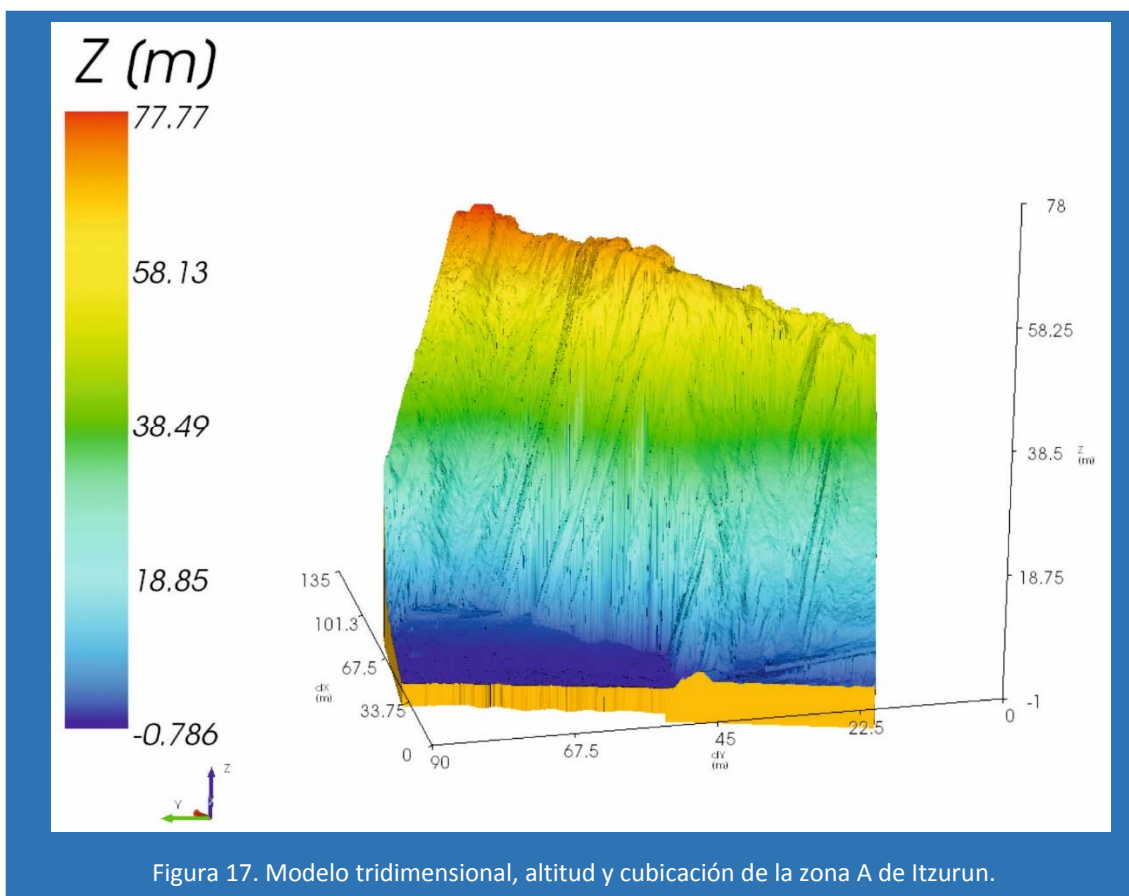
Figura 16. Zonificación del área de la playa de Itzurun.

Zona A. Representa el límite noreste de la playa de Itzurun (Figura 16). Tiene una altitud de 70 metros y una anchura de 25 metros. La figura 17 presenta la imagen correspondiente al modelo tridimensional con la altitud y el desarrollo horizontal. Las imágenes 3D correspondientes al resto de zonas se recogen en el Anexo I.

El talud principal de la zona, tiene una orientación 70/290 y favorece el desarrollo de pequeños procesos gravitacionales. Los taludes secundarios son oblicuos al talud principal, y tienen una orientación N110E. Está generado por la erosión diferencial de estratos, por lo que su desarrollo y morfología están condicionados por la estratificación general del macizo rocoso ($S_0:80/010$).

Los materiales de esta zona pertenecen al Flysch Eoceno, formado por una alternancia de lutitas y areniscas, con potencias de estratos de arenisca de entre 10 y 40 centímetros.

Los tipos de terreno que se han definido para el desarrollo posterior de modelización son: el "Flysch", formado por el frente de los acantilados, y la "Playa", que representa la base formada por la acumulación de arena.



La Zona B tiene una altitud de 64 metros y una anchura de 20 metros (Anexo I). El desarrollo de taludes en todas las zonas de análisis sigue estas mismas pautas, por lo que, para evitar repeticiones, no se hacen consideraciones al respecto por zona. Los materiales de esta zona geológicamente aun forman parte del Flysch Eoceno, con alternancia de lutitas y areniscas. En todo caso, a diferencia de la zona anterior, presentan potencias máximas de 20 centímetros.

Los tipos de terreno considerados para el desarrollo de modelos en esta zona son el “Flysch”, que lo constituyen todos los afloramientos del Eoceno, y el “Camino”, que representa la zona antropizada.

La Zona C tiene una altitud de hasta 40 metros y una anchura de 15 metros (Anexo I). Geológicamente los materiales continúan formando parte del Flysch Eoceno, con una alternancia de lutitas y areniscas, que presenta aún menores potencias en los estratos areniscosos.

La Zona D es la última definida en la entrada hacia el este de la playa de Itzurun. Tiene una altitud de 15 metros y una anchura de 10 metros (Anexo I). Los materiales continúan siendo casi en su totalidad Flysch Eoceno, con potencias menores que en la anterior zona. Cerca del límite sur de esta zona se encuentra el límite Paleoceno/Eoceno, que divide los materiales previamente descritos con las series calcáreas de la zona meridional de Itzurun.

La Zona E es la primera zona de la entrada hacia el oeste de la playa Itzurun. Tiene una altitud de 10 metros y una anchura de 20 metros (Anexo I). Es la primera zona en la que se registran los materiales del denominado “Flysch Calcáreo”, concretamente forma parte de la Formación Itzurun. Los afloramientos presentan una alternancia de calizas y margas, con potencias de estratos de calizas de 15 centímetros.

La Zona F tiene una altitud de 20 metros y un ancho de 15 metros (Anexo I). Geológicamente, los materiales aun forman parte de la Formación Itzurun, pero a diferencia de la zona anterior, los estratos presentan potencias máximas de hasta 40 centímetros.

La altitud del modelo de la Zona G es de 43 metros y su anchura de 35 (Anexo I). La zona está dividida por el Límite Selandiense/Thanetiense, pero, geológicamente, al no

representar un cambio litológico, los materiales a ambos lados del límite continúan siendo parte de la Formación Itzurun. A diferencia de la zona anterior, los estratos calizos presentan potencias máximas de hasta 20 centímetros.

Los tipos de terreno definidos para esta zona son el Flysch y la Playa, al igual que en la Zona H.

La Zona H se encuentra en el límite de la playa de Itzurun. El modelo tiene una altitud de 43 metros y una anchura de 15 metros (**Anexo I**). Esta zona está dividida en dos secciones: la sección principal continúa siendo parte de la Formación Itzurun; la sección sur de la zona lo divide el límite Daniense/Selandiense, que limita la Formación Itzurun con la Formación Algorri, mucho más competente y sin actividad habitual de caída de rocas.

4.3. Discontinuidades y desarrollo de inestabilidades: análisis cinemático

A lo largo del área de estudio se han definido tres familias principales que se repiten, la estratificación o S_0 (80/010), con pequeñas variaciones que se evaluarán individualmente; J_1 o plano de discontinuidad más evidente (70/285); y J_2 o segundo plano de discontinuidad más evidente (20/110) (**Figura 18**).

Las medidas de planos y las proyecciones estereográficas se han realizado de manera independiente para cada zona del área de estudio (**Figura 19**). En todas ellas se han considerado las medidas en las tres familias principales de planos de discontinuidad definidas (S_0 , J_1 y J_2), y los taludes, principal, de orientación general 70/290, y secundario, de dirección N110E, en este caso de orientación al SW 70/190, que es en el que se identifica el origen de la mayor parte de inestabilidades. La totalidad de las medidas se representa en las proyecciones estereográficas.

Comparando las medias por zonas, se puede observar la estratificación (S_0) presenta buzamientos cada vez más bajos desde la Zona A (80/014), al noreste de la playa, hasta la Zona H (65/017), al suroeste de la misma. La dirección general de la estratificación presenta valores similares a lo largo de los acantilados, con pequeñas variaciones puntuales, de un máximo de 7°.

La J_1 presenta buzamientos elevados en todas las zonas con valores mínimos de 55° en la Zona A. A pesar de ello, es destacable que, al suroeste de la playa, principalmente en las zonas E (78/288) y G (80/291) los buzamientos son más elevados, siendo mayores que el de la estratificación (75/013 y 74/010 respectivamente).



Figura 18. Principales familias de planos de discontinuidad de los acantilados de Itzurun (S_0 : estratificación; J_1 : Discontinuidad 1; J_2 : Discontinuidad 2).

La J_2 , al contrario que la J_1 , de bajo valor de buzamiento general, es mayor en la zona noreste de Itzurun, principalmente en la Zona A (32/115), y, menor, progresivamente hacia zonas al suroeste de la playa, con el valor mínimo en la Zona G (11/102).

La orientación relativa de las tres familias principales de discontinuidad y su posición respecto a los taludes de los acantilados condiciona el proceso de caída de rocas, su forma y su tamaño. Así, debido a su disposición, en gran medida ortogonal, la morfología de las rocas caídas a lo largo de la playa es prácticamente rectangular. En todo caso, y dado que la relación entre los planos de discontinuidad no es constante, eventualmente los bloques caídos pueden presentar morfologías irregulares.

De acuerdo con la representación estereográfica (Figura 19) en el talud principal podrían registrarse roturas en cuña, principalmente en las Zonas A y B, y planares en

prácticamente todas las zonas. En todo caso, al tratarse de una alternancia de espesores limitados y unos taludes naturales cuya morfología en detalle está fuertemente condicionada por la meteorización diferencial, el desarrollo de elementos inestables es de significación limitación de tamaños.

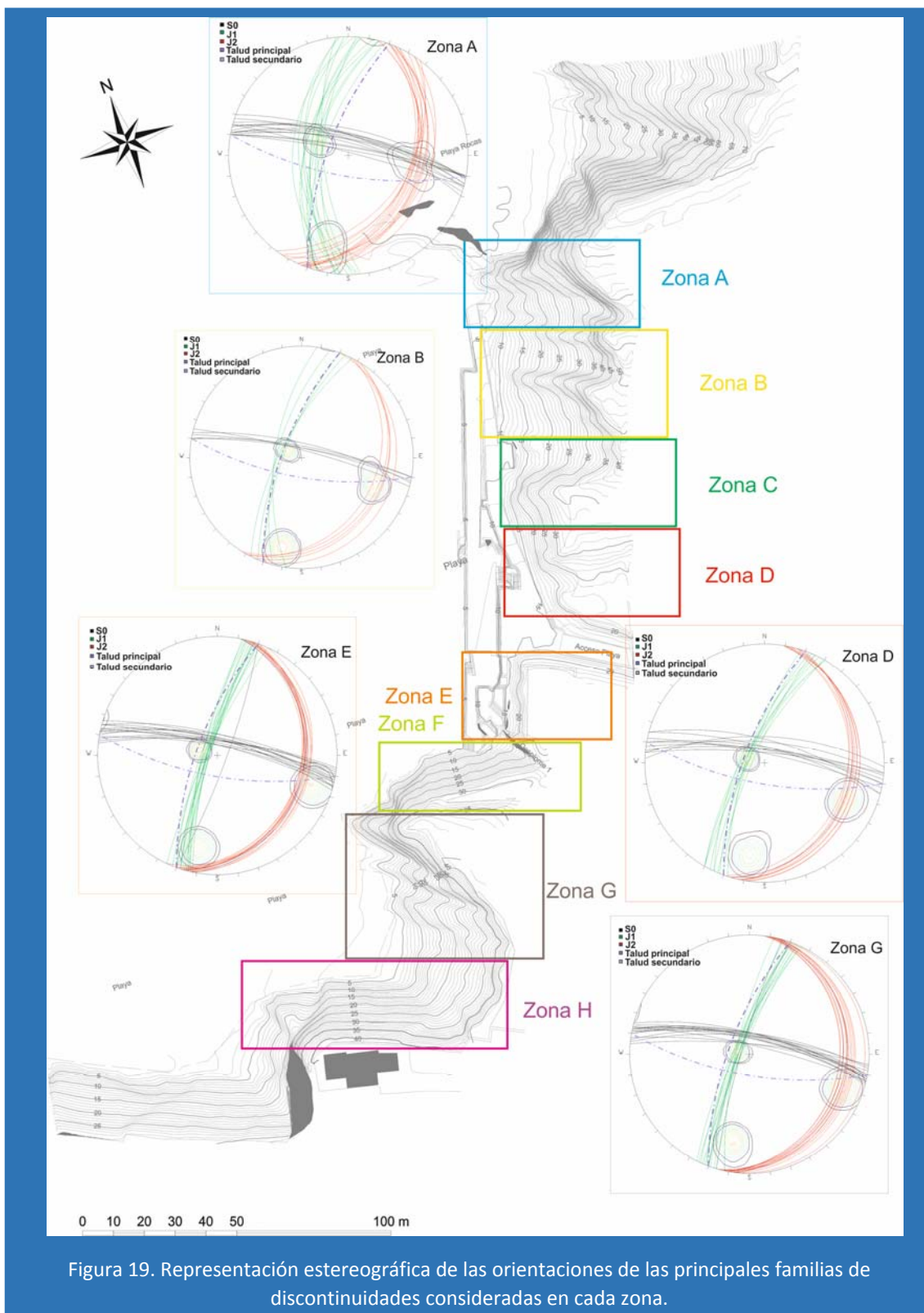


Figura 19. Representación estereográfica de las orientaciones de las principales familias de discontinuidades consideradas en cada zona.

Los taludes secundarios orientados al SW presentan una disposición favorable al desarrollo de vuelcos. Precisamente esta es la forma de rotura más característica de toda la zona y está fuertemente condicionada por la disposición de la estratificación y sus características. En este sentido, aunque la mayor parte de inestabilidades por el vuelco se limitan a bloques de dimensiones elevadas en la Zona f. El descalce de la parte inferior del macizo rocoso y la orientación y buzamiento de las series alternantes, hacen que el acantilado evolucione de forma continua hacia el espacio hueco en su base, pudiendo llegar a ocasionar un vuelco de grandes dimensiones (Figura 20).



Figura 20. Afloramiento de la zona F en el que se muestra un mecanismo de rotura tipo vuelco.

En la Zona H la rotura potencial, un talud infinito, se desarrollaría a partir de los estratos calizos que se encuentran sobre una base plana subparalela margosa. El estrato calizo tiene una potencia relativamente constante y de espesor pequeño respecto a la altura del talud, lo que favorecería el desarrollo de este tipo de inestabilidad.

4.4. Características de los materiales caídos

Además de las observaciones litológicas de los materiales se han realizado un total de 363 medidas de peso de materiales caídos (Tabla 1) mediante los dinamómetros indicados en el apartado metodológico.

En las zonas A hasta D, los materiales caídos más numerosos y significativos, se relacionan con los estratos areniscosos, y son los considerados para la realización de las medidas.

En las zonas E a H son los estratos más calizos los que originan los desprendimientos de mayor desarrollo, por lo que son bloques de estos materiales los considerados en la caracterización.

Como se observa en la tabla, las Zonas A y F son las únicas que presentan caídas de rocas de más de 25 kilogramos. Este hecho está condicionado por la potencia de los estratos de origen en ambas zonas, que es el mayor medido a lo largo de los acantilados, alcanzando por encima de los 40 centímetros.

En los acantilados formados por el “Flysch arenoso” (zonas A, B, C y D) se registra una reducción de peso significativa, desde las rocas de más de 50 kilogramos en la Zona A hasta las rocas de la Zona D, con peso máximos inferiores a 10 kilogramos (Tabla 1, Figura 21). La reducción de peso está condicionada una vez más por las características de los estratos en las áreas fuente y sus potencias, cada vez menores en los acantilados, desde 40 centímetros en la Zona A hasta 10 centímetros en la Zona D.

Tabla 1. Resultados de peso de rocas por zonas de estudio.

ZONAS	A	B	C	D	E	F	G	H
<1kg	5	22	35	24	21	-	8	5
2-5kg	25	28	17	21	9	-	12	8
5-10kg	13	10	6	5	15	-	5	10
10-15kg	6	4	1	-	3	6	4	5
15-25kg	8	2	-	-	-	10	2	-
25-50kg	5	-	-	-	-	5	-	-
50-80kg	1	-	-	-	-	3	-	-
>80kg	-	-	-	-	-	2	-	-
TOTAL	63	56	59	50	48	28	31	28

En el “Flysch calcáreo”, los pesos máximos corresponden a la Zona F y alcanzan hasta 100 kilogramos. En las zonas E y G se registran pesos máximos menores de 10 kilogramos en la E y de 20 kilogramos en la G (Tabla 1). Los estratos ambas zonas son de entre 15 y 20 centímetros.

A partir de estos datos, se ha elaborado un histograma representando cada zona con un color diferenciado (Figura 21).

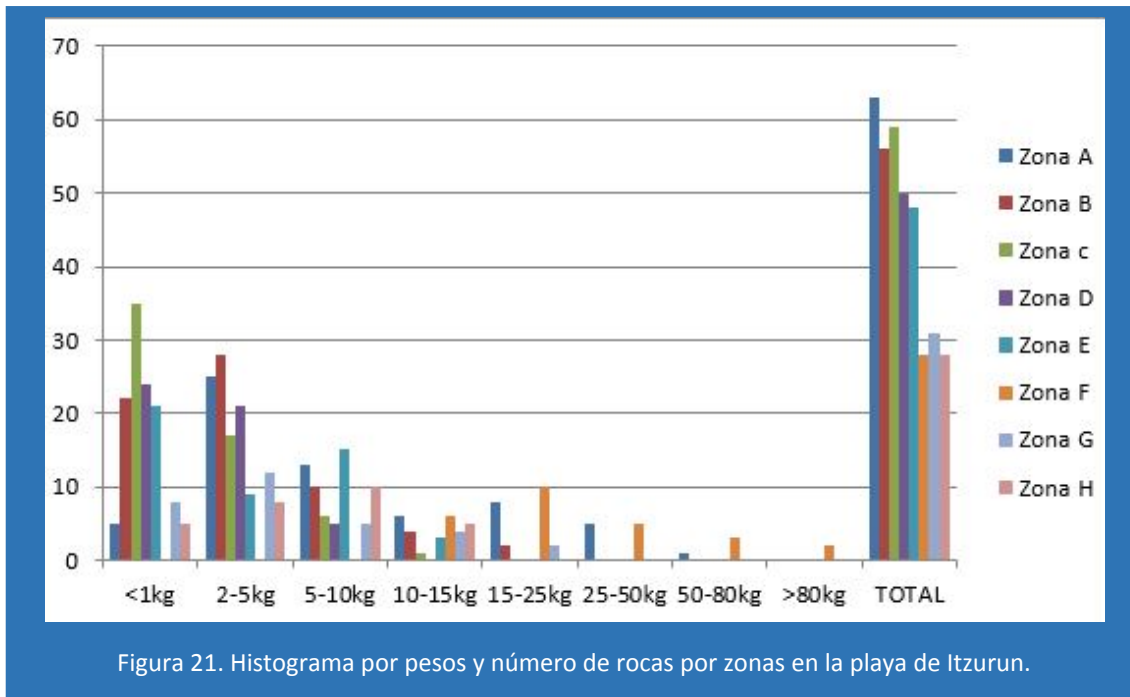


Figura 21. Histograma por pesos y número de rocas por zonas en la playa de Itzurun.

En conjunto, se observa que la mayoría de rocas medidas tienen pesos inferiores a 10 kilogramos. Los especímenes más habituales son los de menos de un kilogramo, seguidos de 2 a 5 kilogramos, principalmente observados al pie de los taludes de la zona noreste de Itzurun (zonas A, B, C y D) (Tabla 1, Figura 21).

Las rocas de entre 5 y 15 kilogramos, tiene una distribución similar en prácticamente todo el talud, exceptuando la Zona C, con valores inferiores al resto, y la Zona D, en la que no se han identificado trozos de este peso. La Zona F es la única que presenta rocas de más de 80 kilogramos (Tabla 1, figura 21).

4.5. Identificación de áreas fuente y trayectorias de desplazamientos

En cuanto a las áreas fuente de desprendimientos se ha elaborado una cartografía de detalle resumiendo el trabajo de campo realizado para este estudio. En la cartografía (Figura 22), se sitúan las “áreas fuente” identificadas, las trayectorias y el alcance de las rocas.

La [tabla 2](#) recoge, por su parte, la cantidad de áreas fuentes identificadas y sus alturas, que están condicionadas por la orientación y disposición de los estratos, además de la exposición de los afloramientos.

Por zonas, las que menor número de áreas fuente presentan son las zonas H y D, con 3 áreas definidas para H y 2 para D. Las zonas G y B, son las zonas con mayor concentración de áreas fuente, con 10 y 9 respectivamente. En el resto de zonas definidas se han identificado 4 áreas fuente ([Figura 22](#)).

En cuanto al desplazamiento inicial de materiales desde las áreas fuente, se diferencian 3 situaciones principales: 1) materiales desprendidos, principalmente a favor de vuelcos que caen hacia el SW, son los típicos de las zonas A, B, C, D y G; 2) Materiales desprendidos que evolucionan sobre el propio talud se observa en las zonas F y H, con orientación inversa a la zona E; 3) Materiales caídos directamente al pie de talud. Son característicos de la Zona E, aunque también se observan en tramos del resto de zonas ([Figura 22](#)).

En cuanto a la morfología de las trayectorias, la mayoría son sinuosas prácticamente en todas las zonas definidas, excepto la Zona E, que presenta mayoría de trayectorias perpendiculares y directas hacia el pie de talud. El resto de zonas, a pesar de tener orientaciones diferentes, condicionadas por las áreas fuente, tienen morfologías similares, con una mayor o menor sinuosidad en función de la verticalidad de las trayectorias, y el terreno que atraviesan ([Figura 22](#)).

Por último, se han identificado el punto final de las trayectorias, definiendo así el alcance de las caídas de rocas, a partir del pie del talud ([Figura 22](#)). Este valor se ha considerado para delimitar las zonas con actividad de desprendimientos.

Su valor se ha establecido en base a intervalos de distancia. Por zonas, se diferencian 3 grupos principales: las zonas A y G, cuyas trayectorias tienen alcances de entre 8 y 10 metros desde el pie del talud; las zonas B, C, D y H, con alcances de entre 3 y 5 metros; y las zona E y F, con barreras instaladas que no presentan alcances más allá de las mismas ([Figura 22](#)).

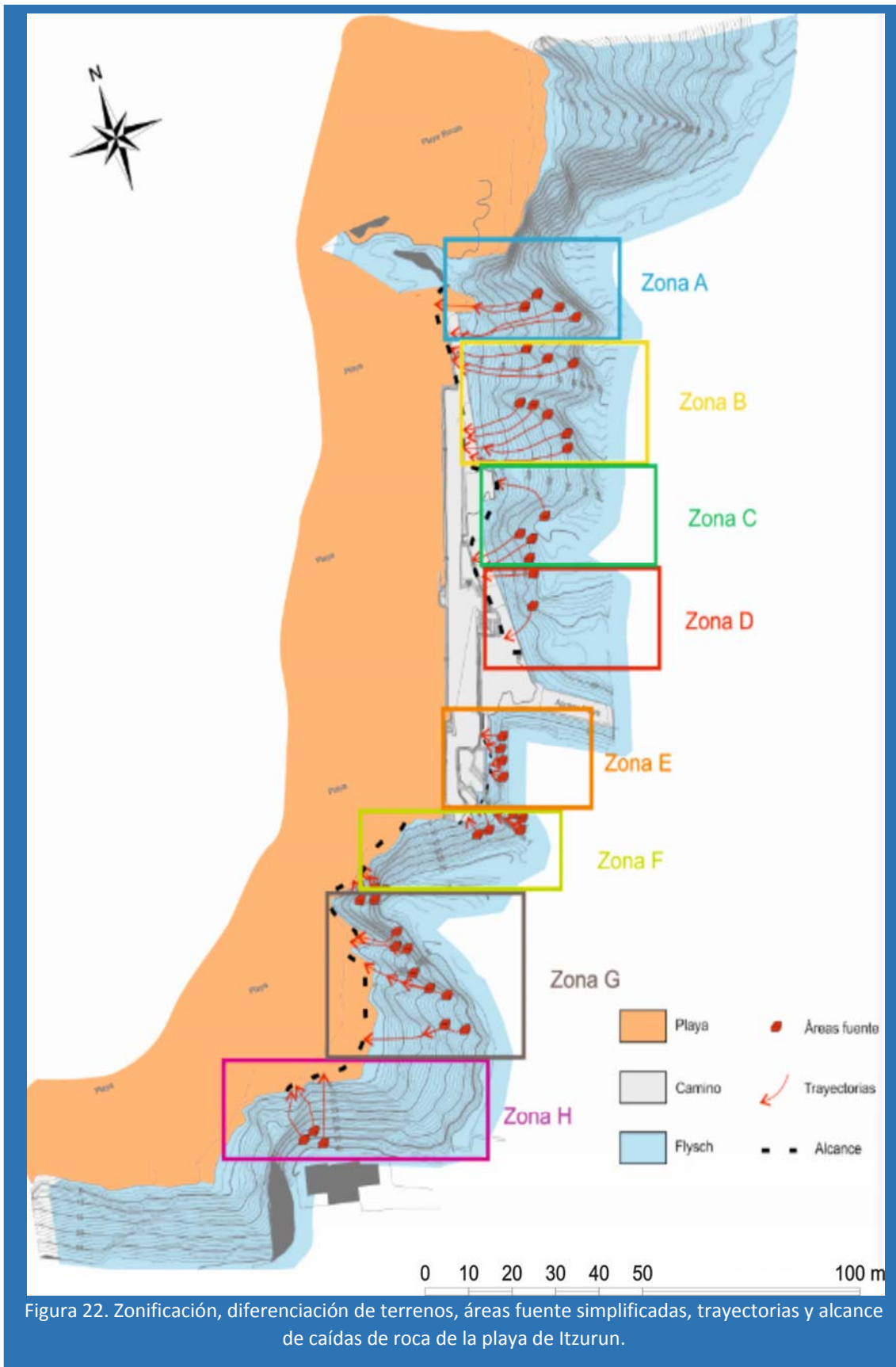


Tabla 2. Parámetros de los taludes de las zonas.

Zonas	A	B	C	D	E	F	G	H
Alturas	10, 23,	14,18,	8,12,	4,5	8,8.3	12,14,	5,10,	15,23,
Áreas	40, 45,	26, 35,	23,36	8,10	9, 9.5,	15, 16,	30, 35	29, 36
fuentes (m)	48,60, 70	37, 40, 48, 50	36	14	10	18		
Forma principal de trayectorias	Sinuosa (Sinu.)	Sinu.	Sinu.	Sinu.	Directa	Sinu.	Sinu.	Sinu.
Alcance desde el pie del talud (m)	8-10	3-5	3-5	3-5	-	-	8-10	3-5

Es precisamente en las zonas donde se ha definido el alcance donde se han realizado las medidas de dimensionado y peso de rocas recogidas en el apartado previo (Figura 23).



Figura 23. Rocas utilizadas para la toma de medidas de pesos en las zonas A (a); E(b);C(c) y D(d)

4.6. Modelización de procesos de caída de rocas en 2D y 3D

Con los datos del trabajo de campo y las nubes de puntos generadas a partir del dron, se han realizado modelos en 2 y 3 dimensiones para simular, en cada zona de estudio, las trayectorias, alcance, impactos y energía de las caídas de rocas. Ello permitirá considerar las posibles medidas de protección a establecer en cada zona.

Los modelos se han desarrollado en base a la zonificación realizada previamente, puesto que la nube de puntos base para generar los modelos tiene un tamaño excesivo para realizar una simulación de conjunto.

Únicamente en la primera zona de estudio se recogen las figuras más representativas del trabajo realizado. En las posteriores zonas se recogen los resultados de forma textual, mientras que los datos y gráficos de cada zona se recogen en los anexos I y II del presente trabajo.

4.6.1. Zona A

En la simulación de la Zona A y, a partir de las observaciones de campo, se han establecido 7 áreas fuente (Figura 22). Desde ellas, se han simulado un total de 350 trayectorias (Figura 24, líneas rojas) para rocas de 40 kilogramos, que corresponden con el máximo peso registrado y serían las inestabilidades de menor impacto (Tabla 1), con áreas fuente situadas a 10, 23, 40, 45, 48, 60 y 70 metros de altura (Figura 22, 24). Las trayectorias coinciden con las observadas, y evolucionan desde las áreas fuente hacia el NW, alcanzando la zona más deprimida del talud y descendiendo perpendicularmente a la línea general de acantilados. Los alcances máximos obtenidos por el modelo avanzan hasta 3 metros dentro de la playa de Itzurun (Figura 24).

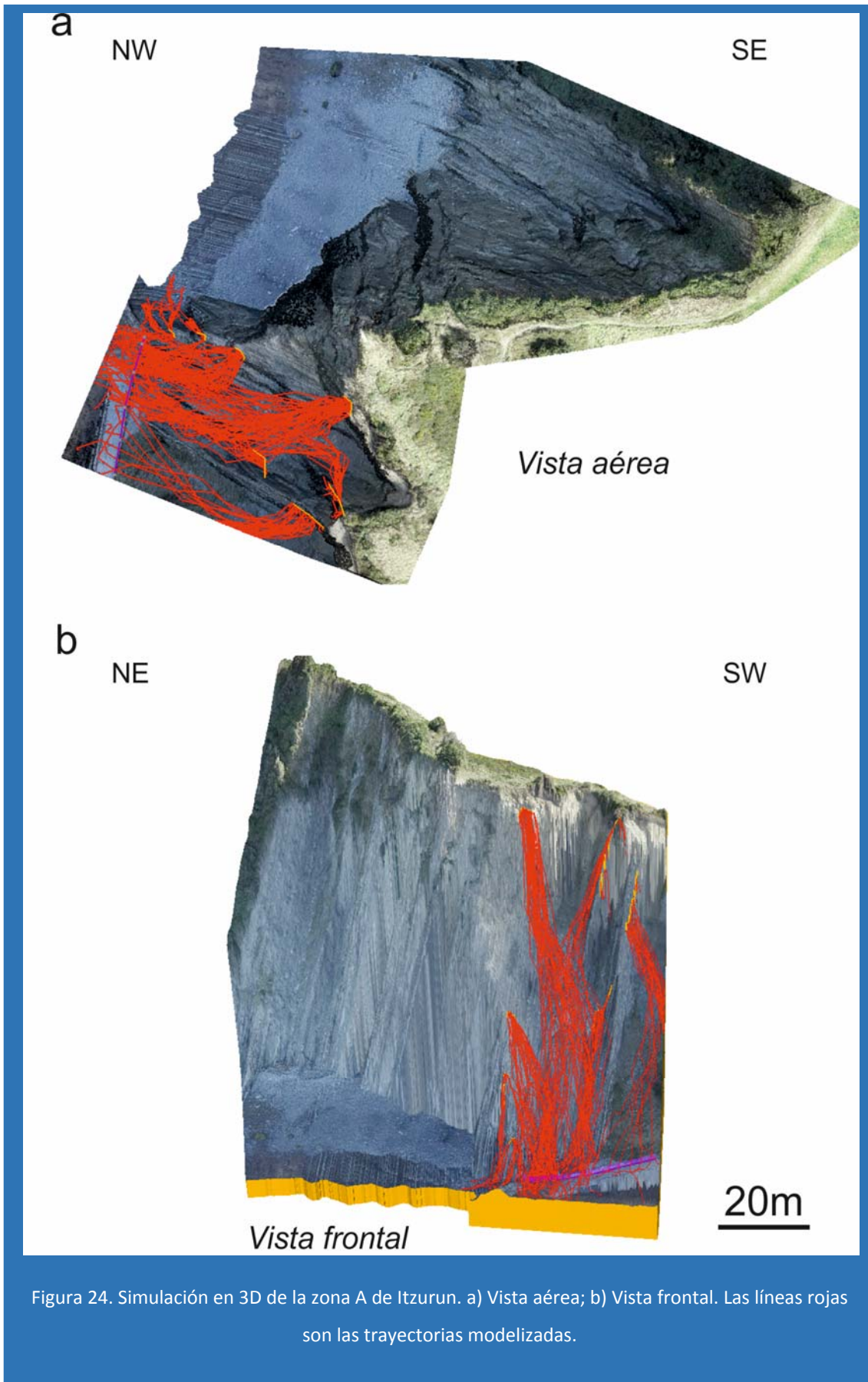


Figura 24. Simulación en 3D de la zona A de Itzurun. a) Vista aérea; b) Vista frontal. Las líneas rojas son las trayectorias modelizadas.

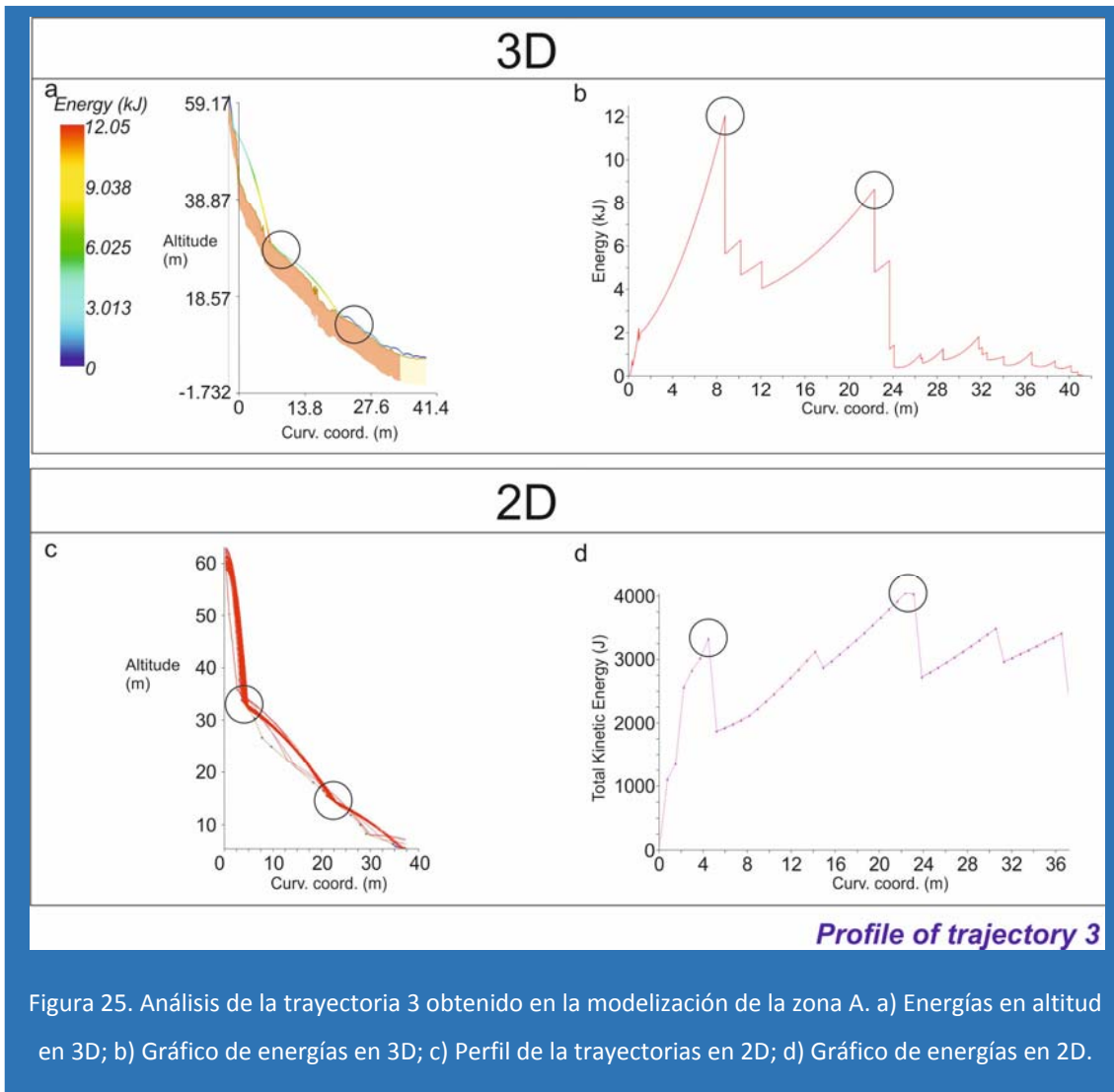
Para el estudio de energía, se ha escogido la trayectoria número 3, que tiene su origen en el área fuente situada a una altura de 40 metros, y es una de las trayectorias más representativas de la modelización respecto a los datos obtenidos en el trabajo de campo (Figura 25.a).

La figura 25 muestra la energía a lo largo del perfil de la trayectoria en las simulaciones 3D (Figura 25.a y b) y 2D (Figura 25.c y d). En ambas figuras se recogen dos esquemas complementarios, dado que los perfiles muestran la energía total en cada punto respecto a la altitud (Figura 25.a y c) y los gráficos (Figura 25.b y d) muestran la energía a lo largo de la línea de desplazamiento, permitiendo identificar los picos de máxima energía (en el caso del modelo 3D la energía se mide en kJ y en el 2D en J).

Indicar que en la simulación bidimensional se utiliza de base el perfil generado en el análisis 3D previo. Esta simulación permite representar, como en el modelo 3D, las trayectorias seleccionadas desde áreas fuentes definidas. En el caso de la Zona A, se han considerado un total de 50 trayectorias (Figura 25. c).

Los datos de energía y alcance coinciden en ambas simulaciones 2D y 3D (Figura 25. d), al igual que en el resto de zonas definidas. Los círculos dibujados en las imágenes reflejan la coincidencia entre las zonas de impacto a lo largo del perfil y los picos de máxima energía que coinciden con los momentos de rebote de la roca contra el talud (Figura 25. a y b) Las energías máximas son de 12 kJ. La energía modal del conjunto de caídas de rocas es de 1.5-2.5kJ y las máximas de 10 a 12kJ, en este caso y para rocas de 40 kilogramos (Tabla 3).

Los gráficos correspondiente se han presentado exclusivamente para la zona A, los análogos para el resto de zonas se recogen en el Anexo II.



4.6.2. Zona B

Las trayectorias presentan morfologías similares a las representadas en la Zona A (Figura 26 a y b). Los rebotes de las caídas de rocas son menos energéticos que los de la zona anterior, dado que el perfil es más bajo y las trayectorias son menos verticales. A pesar de ello, el resalte que se encuentra a 30 metros de altura, condiciona que las trayectorias puedan rebotar y descender verticalmente hacia la entrada peatonal de la playa, ocasionando daños en las estructuras.

Para el análisis de energía se ha escogido la trayectoria número 40, que tiene origen en el área fuente situada a 35 metros de altitud y cuyas caídas son las más energéticas y, por tanto, las que mayor problemática pueden crear. Los gráficos relacionados con este estudio se recogen en el Anexo II. El alcance de las rocas es de aproximadamente el ancho del camino, unos 4 metros desde el pie de talud.

Las energías medias calculadas para la zona son 0.2kJ y las máximas de 0.6 kJ.

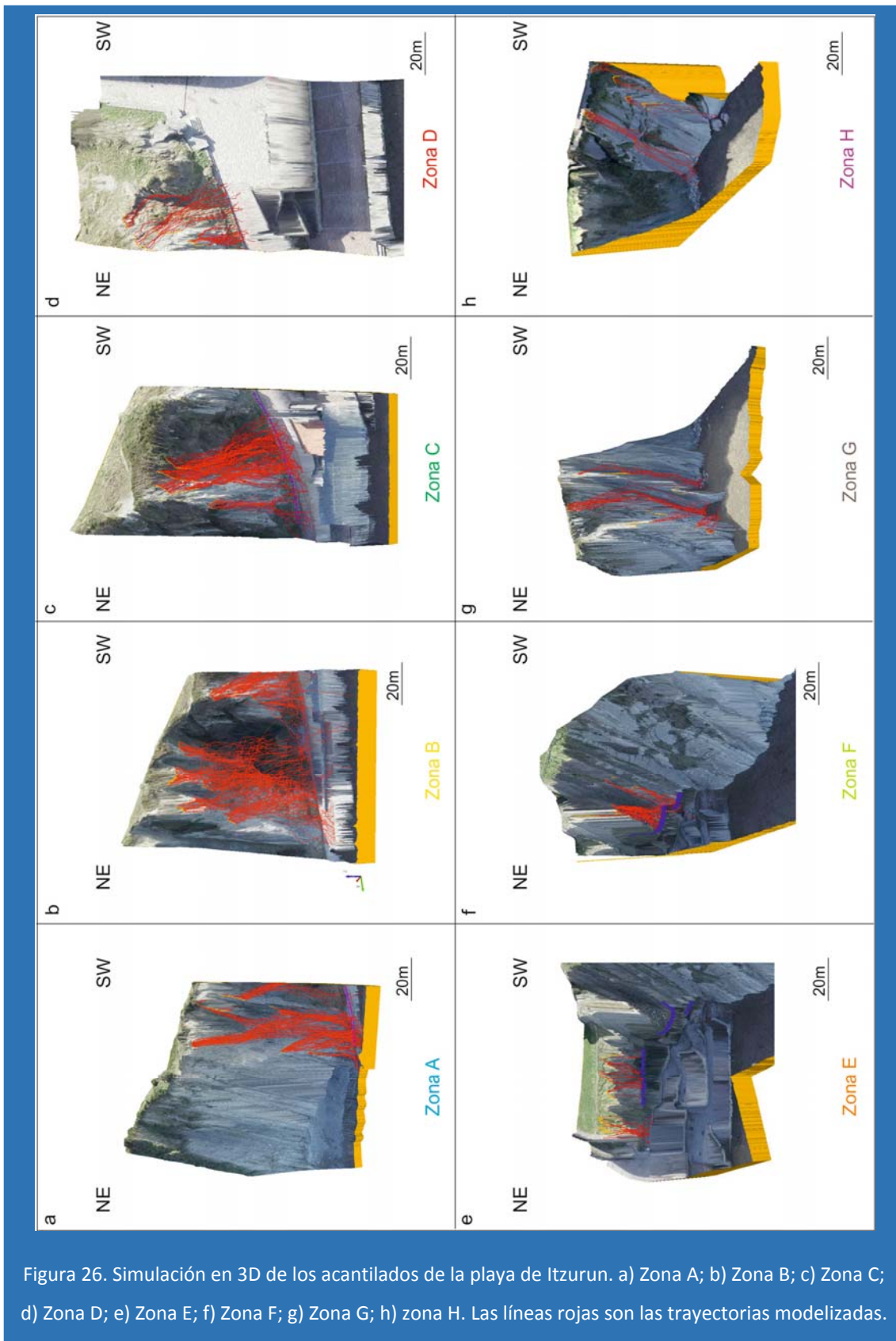


Figura 26. Simulación en 3D de los acantilados de la playa de Itzurun. a) Zona A; b) Zona B; c) Zona C; d) Zona D; e) Zona E; f) Zona F; g) Zona G; h) zona H. Las líneas rojas son las trayectorias modelizadas.

4.6.3. Zona C

Las trayectorias en esta zona presentan curvaturas menores, condicionadas por la menor altura del talud que se reduce a 40 m, y la disposición de los estratos respecto al mismo (Figura 26.c).

Se ha escogido para el análisis de energías la trayectoria 14, que tiene su origen en el área fuente situada a 30 metros de altura (Anexo II) y desciende hacia el camino pasando por un resalte situado a 20 metros de altura, impactando y rebotando de nuevo contra las estructuras de entrada a la playa.

La energía media calculada para la zona es de 0.2 kJ. La energía es menor por la menor altura de origen de las rocas. Los rebotes también son más reducidos y menos energéticos que en las anteriores zonas (Anexo II).

4.6.4. Zona D

En general, las rocas en esta zona tienen trayectorias subparalelas al perfil, con pequeños rebotes y una sinuosidad inferior a las anteriores. Las rocas apenas avanzan medio metro desde el pie del talud, salvo en casos puntuales en los que las rocas pueden llegar a avanzar hasta el camino de entrada (Figura 26.d).

Se ha realizado un análisis de la energía de la trayectoria 16, que tiene su origen en el área fuente situada a 14 metros de altura desde el pie del talud, en la zona de máxima altitud y que presenta caídas más energéticas (Anexo II).

Destacar que, en este caso, la simulación en 2D da lugar a trayectorias que se alejan más del pie del talud, con rebotes de hasta 5 metros de altura (Anexo II).

La energía media calculada para la zona es de 0.1 kJ, dado que las rocas identificadas en la zona son generalmente de pequeño tamaño.

4.6.5. Zona E

Dada la proximidad del talud y la zona de acceso a la playa, las trayectorias que genera el modelo 3D son muy directas, atravesando el camino y golpeando contra el muro frontal en las zonas sin protección. En cambio, en las zonas protegidas con barreras, la simulación permite observar como las rocas no avanzan más allá de las mismas,

incorporando en el modelo una inelástica de 1 metro como la que en la actualidad está instalada en la zona (Figura 26. e).

Se ha analizado individualmente la trayectoria 10, cuyo origen es una de las áreas fuentes situadas a 10 metros de altura (Anexo II), desde lo alto del talud, y por lo tanto de las más energéticas de la zona. En este caso, la simulación de energías y trayectorias termina en la zona de la barrera, donde la energía es máxima al impactar y desciende bruscamente a 0 (Figura 27, Anexo II).

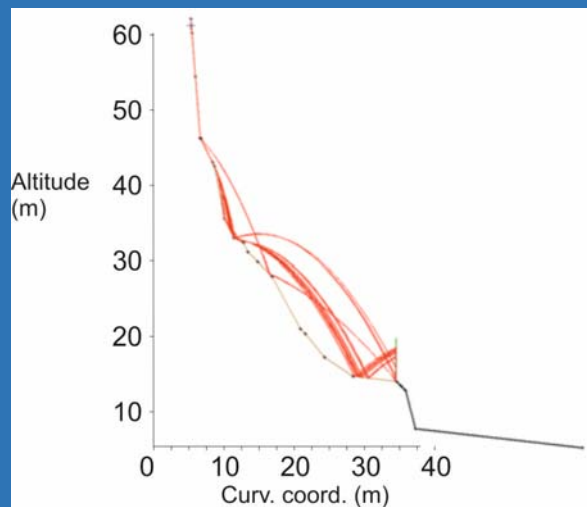


Figura 27. Perfil de la trayectoria 40 de la Zona E y análisis de las trayectorias en 2D que van a impactar contra la barrera instalada.

La energía media calculada es de 0.06kJ, y la energía máxima de 0.2 kJ. Las energías son relativamente bajas respecto al resto de zonas, porque el talud tiene una altura inferior.

Estas simulaciones coinciden con las observaciones de campo. La barrera actual sería suficiente para detener el avance de las rocas. Si no estuviera, el resultado sería similar al del sector sin protección, en el que donde las rocas atraviesan el camino e impactan contra el muro.

4.6.6. Zona F

Principalmente las rocas se liberan desde los estratos situados al noreste de la zona. La disposición de los estratos respecto al talud condiciona el desarrollo de vuelcos de cierta entidad, que impactan a pie de talud, para después descender gravitacionalmente perpendicularmente a las barreras instaladas. Se han identificado,

también, rocas caídas desde los estratos situados al suroeste de la zona, mayoritariamente depositados en la siguiente línea de barreras (Figura 26.f).

La rápida evolución de este talud en el tiempo de realización de este trabajo, ha permitido realizar una comparativa de fotografías de la zona en distintas estaciones. Así se comprueba, que, entre los meses de octubre del 2018 (Figura 28.a) y marzo de 2019 (Figura 28.b) ocurrió en la zona al menos un episodio de gran energía de caídas de roca relativamente masiva.

Dada la potencia de los bloques caídos y la de los estratos anexos, se ha determinado que el origen de las rocas se concentra principalmente en dos de dichos estratos, con una potencia superior.



A nivel de energía se ha analizado individualmente la trayectoria 137, cuyo origen es un área fuente situada a 16 metros. Del mismo modo que en la anterior zona, se ha trabajado en los modelos con una barrera inelástica de 1 metro, similar a la que en la actualidad se encuentra en la zona, tanto en el 3D como en el 2D (Anexo II).

La energía media para rocas de 100 kilogramos es de 2 kJ y la energía máxima calculada es de entre 4 y 5 kJ. Son las energías más altas registradas en estos sectores, puesto que también son las rocas de mayor tamaño.

4.6.7. Zona G

Las trayectorias simuladas se dividen en dos dinámicas fundamentales: la primera de ellas se relaciona con las áreas fuente de menor altitud, en las que las rocas se liberan desde el estrato en dirección NW e impactan en el muro de los afloramientos; la segunda se corresponde con zonas erosionadas en las que las rocas descienden con trayectorias prácticamente verticales (Figura 26.g).

Se ha escogido para el análisis de trayectorias individualizado la trayectoria 13 de caída de roca, que tiene su origen en el área fuente más elevada definida, a 35 metros de altura (Anexo II).

La energía media es de 0.01 kJ y la energía máxima es de 1.8kJ. Estos valores se calculan a pie de talud, pudiendo ser más elevada la energía en los rebotes intermedios de la roca con el talud (Anexo II). En este caso, las energías son elevadas por la verticalidad de las trayectorias, con un pequeño rebote cuando impacta contra la arena a pie de talud (Anexo II).

4.6.8. Zona H

Las trayectorias son prácticamente paralelas a la estratificación, sin apenas rebotes intermedios y con un pequeño rebote al impactar contra la playa, dando lugar a un alcance aproximado de 2 metros a partir del pie del talud (Figura 26.h).

Para el análisis individual de energía se ha escogido una roca cuyo origen se encuentra en el área fuente más elevada, a 36 metros de altura. La energía media calculada en la zona es de 0.2 kJ, puesto que las rocas identificadas no son de gran tamaño ni peso (Anexo II).

4.7. Resumen de datos

Se ha elaborado una tabla resumen contrastando los datos obtenidos en el trabajo de campo y los resultados de las modelizaciones realizadas por zonas (Tabla 3). Esta tabla, incluye en primer lugar, una descripción de conjunto de la zona, dimensiones,

materiales, potencia de los estratos y orientación de los taludes. A continuación, se recogen los valores de los modelos de simulación condicionados por la naturaleza del terreno. Contextualizada cada zona, se indican las orientaciones de las familias principales y las tipologías de rotura. Por último, se definen los pesos de rocas máximas medidas y utilizadas como base para la simulación, junto con las energías máximas de cada zona de estudio.

Tabla 3. Resumen de los parámetros de los taludes de las zonas.

ITZURUN	CAMPO						MODELO						CAMPO						MODELO		
	ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D	ZONA E	ZONA F	ZONA G	ZONA H	RN		RT		30		65/017		Talud infinito		Caída de rocas		
Dimensiones Altura/Ancho	70 x25m	64x20m	40x15m	15x10m	10x20m	20x15m	43x35m	43x15m	Playa: 0.6		Playa: 0.6		Sin medida de planos		S ₀ 74/010 J ₁ 80/291 J ₂ 11/102		Caída de rocas		5		
Materiales	Areniscas y lutitas	Areniscas y lutitas	Areniscas y lutitas	Areniscas y lutitas	Calizas y margas	Calizas y margas	Calizas y margas	Calizas	Camino: 0.35		Camino: 0.35		Sin medida de planos		Des. Vuelco		Caída de rocas		20		
Potencia estratos (cm)	10-40	>20	10-15	>15	15	40	>20	10-20	Camino: 0.35		Camino: 0.35		Des. Vuelco		Des. Vuelco		Caída de rocas		100		
Orientación taludes	Principal: 70/290 Secundario: 70/190																				
RN	Playa: 0.6		Camino: 0.35		Camino: 0.35		Camino: 0.35		Camino: 0.35		Camino: 0.35		Camino: 0.35		Camino: 0.35		Playa: 0.6		Playa: 0.6		
RT	Flysch: 0.5 Flysch y Camino: 0.8																				
Ángulo de fricción(°)	30																				
Medidas de planos	S ₀ 80/014 J ₁ 55/275 J ₂ 32/115	S ₀ 80/012 J ₁ 68/290 J ₂ 15/116	Sin medida de planos		S ₀ 77/010 J ₁ 73/295 J ₂ 16/104	S ₀ 75/013 J ₁ 78/288 J ₂ 17/107	Sin medida de planos		S ₀ 74/010 J ₁ 80/291 J ₂ 11/102	Sin medida de planos		Sin medida de planos		Sin medida de planos		Sin medida de planos		Sin medida de planos		Sin medida de planos	
Tipo de rotura	Vuelco/Des - prendimiento		Vuelco/Des.		Vuelco/Des.		Vuelco/Des.		Vuelco/Des.		Vuelco/Des.		Vuelco/Des.		Vuelco/Des.		Vuelco/Des.		Vuelco/Des.		
Pesos máximos de rocas (kg)	40		2.4		1.8		1.5		3		100		20		5		5		5		
Energía máxima (kl)	10-12		0.2-0.6		0.2		0.1		0.2		4-5		1.8		0.2		0.2		0.2		

4.8. Recomendaciones

De acuerdo con la problemática de inestabilidades registrada, se ha elaborado una tipología de actuaciones respetuosas con el entorno del presente trabajo y que se consideran recomendadas para la playa de Itzurun. Estas actuaciones buscan generar un mínimo impacto en este entorno de gran valor.

Se han considerado 4 tipologías de actuación que pueden utilizarse de forma individual o combinada:

-**Barreras rígidas** de madera con refuerzos internos similares a las ya existentes en la Zona E, donde están instaladas junto al acceso peatonal de la playa de Itzurun. Su efecto en la parte más cercana a la entrada de la playa, que en la actualidad carece de dicha barrera, ha sido simulado con los programas de modelización. En este caso, una barrera de 1 metro de altura para una energía máxima 0.2 kJ permitiría evitar que las rocas alcanzasen el camino de acceso.

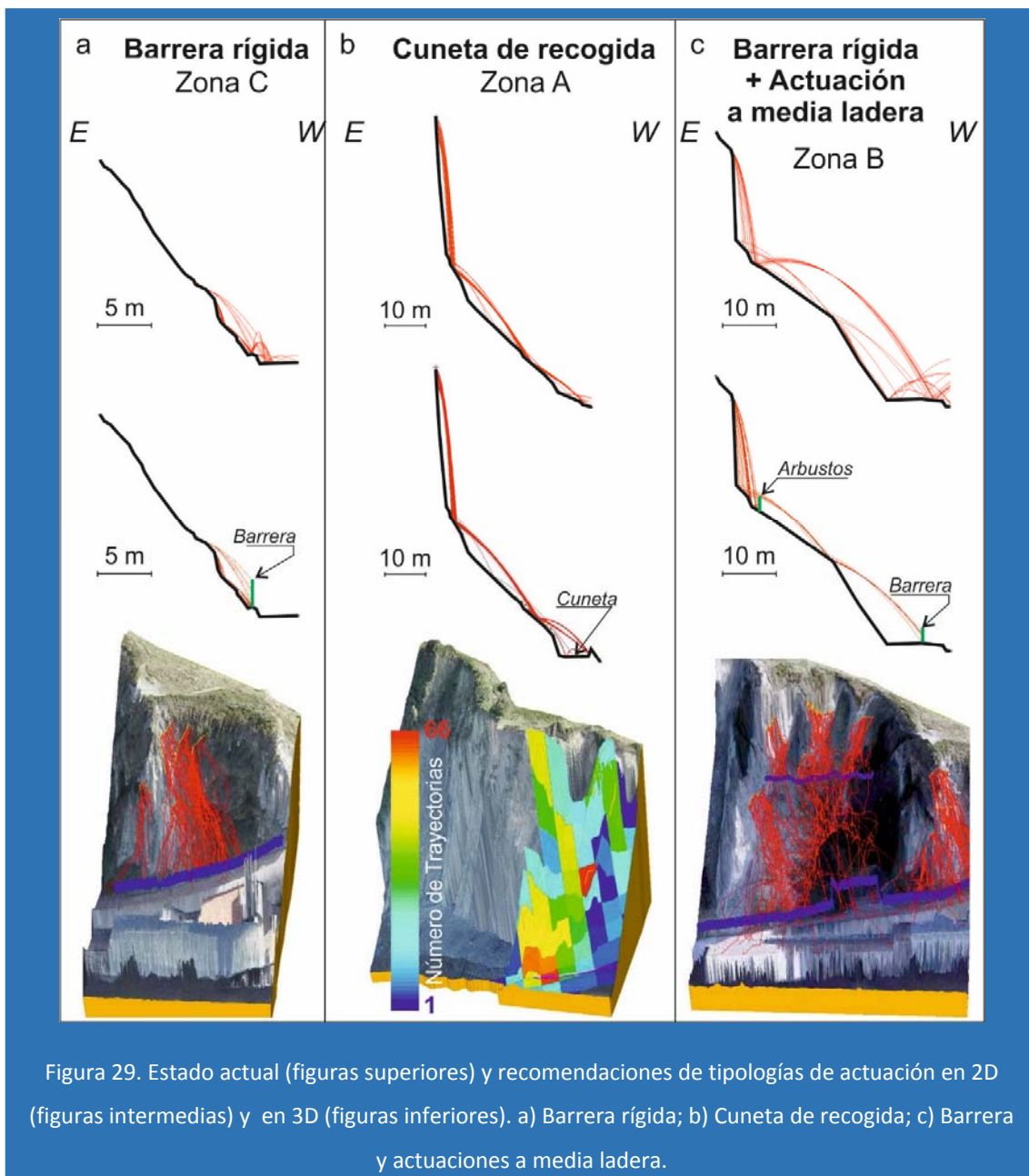
- **Cunetas de recogida.** El desarrollo de cunetas de entre 1 y 2 metros de anchura, pueden favorecer la retención de rocas antes de alcanzar las vías de acceso y elementos de protección, puesto que las trayectorias no alcanzan distancias más allá de esta zona a pie de talud. El efecto de esta actuación en la Zona A, ha sido simulado y se muestra en la [Figura 29](#). La cuneta debería limpiarse periódicamente para evitar la acumulación de materiales y que así pueda mantener su funcionalidad.

-**Actuaciones a media ladera.** En zonas en las que la morfología del talud favorece el rebote de rocas se propone instalar elementos de retención que servirán para limitar los rebotes. Con este fin, pueden considerarse entre otros la plantación local de arbustos que favorecen la retención de rocas de manera natural. Una actuación de este tipo es simulada para la Zona B, que presenta un resalte a 30 metros de altura, que hace que las rocas evolucionen directamente hasta el camino de entrada, impactando contra las estructuras ([Figura 29](#)). Esta actuación se completaría con una barrera de 2 metros a pie de talud

-**Delimitación de zonas de alcance.** En las zonas G y H del suroeste de Itzurun los acantilados se desarrollan hasta la playa, por lo que no se recomienda realizar actuaciones constructivas, si no acciones informativas y preventivas. Así, se plantea la

delimitación de las zonas de alcance de caída de rocas con su energía, elaborando así un mapa de recomendaciones de uso frente al riesgo de procesos de desprendimientos en la playa. Esta aproximación sería aplicable, también, a otros sectores en los que la recurrencia y entidad de los procesos de inestabilidad desaconsejan otras formas de actuación y en las que la delimitación de las zonas de mayor y menor seguridad puede ser una herramienta de gestión recomendada.

Todas las actuaciones requieren, en todo caso, de un seguimiento continuo con el objetivo de evaluar su efectividad, pudiendo servir de referencia para actuaciones similares en entornos que requieran una protección especial.



5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El litoral del municipio de Zumaia es un **gran activo cultural y natural** dentro de la Costa Vasca. El uso recreativo de sus playas y la singularidad geológica y paisajística de sus acantilados dotan al entorno de elementos distintivos que generan una importante atracción.

En este marco, la playa de Itzurun, lugar en el que se ha focalizado el presente trabajo, es una de las **zonas de mayor actividad**. Los continuos **procesos de inestabilidad** registrados y la gran **afluencia de visitantes**, hacen necesario el **estudio en detalle** de la problemática de caída de rocas, con el fin de evaluar las posibles **estrategias de actuación y gestión para limitar impactos** tanto económicos como sociales.

El área de estudio se extiende desde la Punta Mariantón hasta el límite de la playa de Algorri. En este recorrido, se ha reconocido la **dinámica de procesos costeros** y gravitacionales, delimitando 5 sectores principales en cuanto a su tipología evolutiva. Esta **sectorización** incluye también la diferenciación de espacios en función de su uso y afluencia de visitantes, definiendo como **área prioritaria** a estudiar la playa de Itzurun. Al norte de la misma, los acantilados se elevan sobre una zona de rasa mareal, en la que se registra, particularmente al norte de la misma, caídas de bloques de gran tamaño, a partir de estratos particularmente potentes del “Flysch Arenoso”; en este sector también se ha registrado una rotura en masa de grandes dimensiones en relación con los afloramientos más arcillosos del flysch. Al sur de la playa, el saliente de Punta Algorri y la playa del mismo nombre, se relaciona fundamentalmente con materiales competentes, las posibles formas de inestabilidad corresponden, en gran medida, a roturas en talud infinito o indefinido, que involucran “planchas” de roca de dimensiones notables. Se trataría, en todo caso, de un proceso de baja recurrencia que se ve favorecido por la acción del oleaje. Indicar la posibilidad de vuelcos a distintas escalas en la playa de Algorri, en el talud en el que aflora el límite K/Pg.

En el entorno de la playa de Itzurun, la caída de rocas es el proceso gravitacional principal. Para el desarrollo de modelos de simulación se realizó una zonificación previa, dado que la densidad de las nubes de puntos obtenida mediante dron es

demasiado elevada para ser trabajada en su conjunto. Concretamente se han diferenciando **8 zonas principales** (A→H) en la playa. Aunque esta **zonificación** se hizo por motivos técnicos, las zonas delimitadas se han establecido atendiendo a la homogeneidad de materiales, orientación de discontinuidades, naturaleza del terreno, dimensionado y peso de las rocas desprendidas y dinámica de desprendimientos.

De forma general, en todas las zonas los **condicionantes geológicos** facilitan el desarrollo de procesos de inestabilidad de entidad limitada, pero continuos en el tiempo. El principal condicionante es la **erosión diferencial**. Este fenómeno ocurre cuando en una alternancia de materiales más y menos competentes, como es el caso de los acantilados flyschoides de Itzurun, los estratos menos competentes se erosionan con facilidad, mientras los estratos más competentes quedan más expuestos y generan resaltes con voladizos desde los que la red de discontinuidades determina la forma de caída de bloques de roca. Además, la disposición de las tres **familias principales de discontinuidad** (S_0 , J_1 y J_2), junto con el desarrollo superficial de las mismas, condiciona el **peso y dimensiones** de las rocas para cada zona.

Las dos formas de caída más representadas son: vuelcos a favor de la **estratificación** (de orientación en la Zona A de 80/014 hasta 65/017 en la Zona H), habituales en todo el entorno de la playa y que llegan a tener cierta entidad; caídas directas en forma de pequeños bloques que se desprenden de los estratos en zonas en las que el acantilado está más próximo a la playa y sus accesos.

La energía que alcanzan estos elementos desprendidos depende directamente de la altura de los taludes, su inclinación y el peso de los mismos.

Con los datos del trabajo de campo y las **nubes de puntos** generadas a partir del dron, se han realizado modelos en 2 y 3 dimensiones para simular, en cada zona de estudio, las **trayectorias, alcance, impactos y energía** de las caídas de rocas.

La **modelización tridimensional** permite realizar un análisis detallado de la evolución de elementos inestables sobre una superficie tridimensional de detalle del terreno. De esta forma, a partir de las áreas fuente reconocidas en el trabajo de campo, genera trayectorias complejas, que incluyen desarrollos laterales, y permiten simular con mayor precisión la evolución de los materiales desprendidos por las vertientes. Esta

información es contrastada con la información de campo, lo que, en su caso, permite validar la información obtenida. Las ventajas de este modelo residen en la facilidad y precisión en la simulación de trayectorias y alcance de rocas, lo que permite avanzar comparativas entre las dinámicas evolutivas de los procesos de inestabilidad identificados en cada zona de estudio. Del mismo modo, se determina la energía de los elementos inestables a lo largo de su trayectoria completa, y se obtienen, entre otros, los valores de energía máximos y medios. Finalmente, permite considerar distintas formas de actuación en el terreno, principalmente la instalación de barreras y mallas en una imagen 3D, aportando los valores de energía de impacto necesarios para los oportunos cálculos de diseño.

Por su parte, la **modelización bidimensional** permite variar los perfiles de caída. Así, a partir de la trayectoria del modelo 3D, se pueden considerar actuaciones sobre el terreno, modificando la topografía original y realizando así una comparativa en las trayectorias de las rocas caídas antes y después de la modificación propuesta. También se pueden introducir en las simulaciones elementos de estabilización, como barreras y mallas, y contrastar los resultados obtenidos con los del modelo 3D.

Ambas modelizaciones representan herramientas de gran utilidad que son complementarias entre sí. De este modo, la **metodología desarrollada** permite evaluar con un mayor detalle el proceso de caída de rocas.

En nuestro caso, el estudio realizado ha permitido **conocer la dinámica de los procesos gravitacionales** en los acantilados que bordean la playa de Itzurun, delimitando las zonas de alcance de caída de rocas y su energía. El trabajo, elaborado por zonas, permite establecer las trayectorias de caída de rocas, su alcance y energía, con lo que se puede desarrollar una valoración inicial de la problemática de cada una de ellas y plantear formas de actuación particulares. Se puede destacar, que los valores de energía máxima se registran en la Zona A (parte final del acceso nororiental a la playa), de 10 a 12kJ y en la Zona F (acceso suroccidental), de 4 a 5 kJ, y Zona G (playa), 1.8kJ. En el resto de las zonas la energía máxima varía entre 0.1 y 0.6 kJ. Indicar que en la Zona H únicamente se ha considerado la caída de rocas y no la posible caída de una “plancha” a favor de la estratificación. En cuanto a la recurrencia, la caída de rocas, exceptuando la citada posible rotura en talud infinito en la Zona H es continua en

todas las zonas. En todo caso, la Zona F se ha evidenciado como particularmente activa en el periodo de estudio. Esta evolución es particularmente preocupante, en la medida en la que el desarrollo de estos vuelcos va generando el descalce de los estratos que pueden llegar a desarrollar un vuelco masivo de dimensiones importantes. ón es particularmente preocupante, en la medida en la que el desarrollo de estos vuelcos va generando el descalce de los estratos que pueden llegar a desarrollar un vuelco masivo de dimensiones importantes.

En este contexto, se ha desarrollado una **tipología de actuaciones** para controlar los efectos negativos de la caída de rocas. Dado el valor paisajístico y geológico del entorno, se trabaja con actuaciones que buscan ser mínimamente invasivas y respetuosas, tratando de mantener el carácter natural del entorno. Se trata fundamentalmente de barreras rígidas de madera con refuerzo interno, cunetas de recogida y actuaciones a media ladera, como barreras de arbustos o similar. En zonas en las que la caída de rocas se desarrolla directamente en la playa, se propone trabajar con medidas de información y advertencia. Se ha simulado la adecuación de estas medidas en las zonas A, actuación mediante cuneta de recogida, B, actuación a media ladera y barrera, y C, actuación de barrera.

Todas las actuaciones requieren, en todo caso, de un **seguimiento** continuo con el objetivo de evaluar su efectividad, pudiendo servir de referencia para actuaciones similares en otros entornos que requieran una protección especial.

BIBLIOGRAFIA

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial cause for the cretaceous-tertiary extinction. *Science*, 208, 1095-1108.
- Arz, J.A., Canudo, J.I., Molina, E. (1992). Estudio comparativo del Maastrichtiense de Zumaya (Pirineos) y Agost (Béticas) basado en el análisis cuantitativo de los foraminíferos plantónicos. *Actas III Congreso Geológico de España*. Tomo 1, 487-491.

- Ayala-Carcedo, F.J., Andreu, F.J., Fe, M., Ferrer, M., De Simón, A., Fernández, I., Olalla, C., Gómez, J., Sampedro, J., Cienfuegos, F.J. (1987). Manual de taludes. Instituto Geológico y Minero de España.
- Baceta, J.I., Bernaola, G., Orue-Etxebarria, X., Apellaniz, E., Pujalte, V., Caballero, F. (2005). Contribuciones del Pirineo Vasco al conocimiento de la crisis biológica del límite Cretácico- Terciario. *Munibe (Antropología-Arkeologia)* 57.
- Baceta, J.I., Bernaola, G., Orue-Etxebarria, X., Apellaniz, E. Martin-Rubio, M. (2012). El Flysch del Litoral Deba-Zumaia. Una “ventana” a los secretos de nuestro pasado geológico. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- Bird, E. (2000). Coastal geomorphology: an introduction. John Wiley & Sons. New York, 317 p.
- Bourrier, F., Hungr, O. (2013) Rockfall Dynamics: A Critical Review of Collision and Rebound Models. *Rockfall Engineering*; Nicot, S., Lambert, F., Eds.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, pp. 175–209.
- Burbano de Ercilla, S. (2003). Editorial Tebar, ed. Física general. Madrid.
- Bustabad-Rey, J. A. (1980). El Bulk Carrier en la Práctica. URMO, S.A. de Ediciones Bilbao (pág. 102).
- Crosta G.B., Agliardi F. (2004). Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4(4):583–598.
- Dinarès-Turell, J., Pujalte, V., Stoykova, K., Elorza, J. (2013). Detailed correlation and astronomical forcing within the Upper Maastrichtian succession in the Basque Basin. *Boletín Geológico y Minero*, 124 (2): 253-282
- Emmer, A. (2018). Geographies and Scientometrics of Research on Natural Hazards *Geosciences* 2018, 8, 382.
- Erisman, T.H., Abele, G. (2002). *Dynamics of Rockslides and Rockfalls*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; Volume 66.
- Frattini P., Crosta G.B., Carrara A., Agliardi, F. (2008). Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically based approaches. *Geomorphology* 94(3–4):419– 437

- Frattini P., Crosta G.B., Agliardi F. (2012). Rockfall characterization and modeling. Clague, J.J., Stead, D. (eds). Landslides types, mechanisms and modeling. Cambridge University Press, Cambridge, pp 267–281.
- Glade T. (2003). Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Die Erde* 134:121–138.
- Hernández-Gutiérrez, L.E., Santamarta-Cerezal, J.C., Olalla-Marañón, C., Rodríguez-Losada, J.A., Muñiz-Menéndez, M., González-Gallego, F.J., Rodríguez-Martín, J., Pomares-Rodríguez, M., López-Felipe, M., Lomoschitz, A., Mora-Figueroa, A. (2018). Ingeniería Geológica en Terrenos Volcánicos. Métodos, Técnicas y Experiencias en las Islas Canarias. Hernández-Gutiérrez, L.E., Santamarta-Cerezal, J.C., (eds). Ilustre Colegio Oficial de Geólogos: Madrid, Spain. *Remote Sens*, 10 (18-20), 1923.
- Mathey, B. (1982). El Cretácico superior del Arco Vasco. El Cretácico de España. Universidad Complutense de Madrid, 111-136.
- Michoud, C., Derron, M.H., Horton, P., Jaboyedoff, M., Baillifard, F.J., Loyer, A., Nicolet, P., Pedrazzini, A., Queyrel, A. (2012). Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Science* 12(3):615–629.
- Orue-Etxebarria, X., Bernaola, G., Baceta, J.I., Angori, E., Caballero, F., Monechi, S., Pujalte, V., Dinarès-Turell, J., Apellaniz, E., Payros, A. (2004). New constraints on the evolution of planktic foraminifers and calcareous nannofossils across the Paleocene-Eocene boundary interval: the Zumaia section revisited. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh*, 234, 223-259.
- Orue-Etxebarria, X., Alegret, L., Apellaniz, E., Arenillas, I., Baceta, J.I., Bernaola, G., Caballero, F., Dinarès-Turell, J., Martín-Rubio, M., Molina, E., Ortíz, S., Pujalte, V., Schmitz, B. (2007). The Zumaia Section: a robust candidate for the placement of the Danian/Selandian and Selandian/Thanetian boundaries. International Workshop of the Paleocene Working Group. Zumaia. Volume of Abstracts, 33-35.
- Panizza, M., Piacente, S. (2003). *Geomorfologia Culturale*. Pitagora Editrice, Bologna, 350 pp.

- Panizza, M., Piacente, S. (2008). Geomorphology and cultural heritage in coastal environments. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*31, 205-210.
- Pedoja, K., Husson, L., Johnson, M.E., Melnick, D., Witt, C., Pochat, S., Nexer, M., Delcaillau, B., Pinegina, T., Poprawski, Y., Authemayou, C., Elliot, M., Regard, V., Garestier, F. (2014). Coastal staircase sequences reflecting sea-level oscillations and tectonic uplift during the Quaternary and Neogene. *Earth-Science Reviews* 132, 13-38.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. (1964). Atlas and glossary of primary sedimentary structures. Springer Verlag, New York, 370 pp.
- Pralong, J.P. (2004). Pour une mise en valeur touristique et culturelle des patrimoines de l'espace alpin: le concept d'«histoire totale». In: T. Busset, L. Lorenzetti & J. Matieu (Eds.), « Tourisme et changements culturels - Histoire des Alpes 2004/9 », Chronos, Zurich, 301-310.
- Pujalte, V., Baceta, J.I., Dinarès-Turell, J., Orue-Etxebarria, X., Parés, J.M., Payros, A. (1995). Biostratigraphic and magnetostratigraphic intercalibration of latest Cretaceous and Paleocene depositional sequences from the deep-water Basque basin, western Pyrenees, Spain. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 136 (1-2), 17-30.
- Sarro, R., Riquelme, A., García-Davalillo, J.C., Mateos, R.M., Tomás, R., Pastor, J.L., Cano, M., Herrera, G. (2018). Rockfall Simulation Based on UAV Photogrammetry Data Obtained during an Emergency Declaration: Application at a Cultural heritage Site. *Remote Sens*, 10 (12), 1923.
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Abellán, A., Jordá, L. (2016). «Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos». 10º Simposio Nacional Ingeniería Geotécnica. La Coruña, 19-21.

Documentos oficiales

- Convenio Europeo del Paisaje de Florencia, de 20 de octubre de 2000.
- DECRETO 34/2009, N.º 35 de 10 de febrero, declaración del Biotopo Protegido el tramo litoral Deba-Zumaia, BOPV, jueves 19 de febrero de 2019.

- Orden Ministerial de 21 de junio de 2001 sobre tarjetas profesionales de la Marina Mercante, DL-50-Guipuzcoa. BOE, 10 de septiembre de 2001.
- Vectores o ejes estratégicos VI de El Plan de Turismo de Zumaia, 2018-2021. Ayuntamiento de Zumaia, en Mayo de 2018.

Referencias Web

- Geoparque de la Costa Vasca: <https://geoparkea.eus/es/> Fecha de consulta: Junio 2019
- Google Maps: <https://www.google.com/maps> Fecha de consulta: Junio 2019

AGRADECIMIENTOS

Al equipo del Geoparque de la Costa Vasca, en especial a su director Asier Hilario, por su disponibilidad y ayuda durante la realización del trabajo.

Gracias también a los miembros del grupo de investigación de Hidrogeología, Geotecnia y Medio Ambiente (HGI) de la Universidad del país vasco (UPV/EHU), por sus consejos y apoyo.



Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad
Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria
Landscape management. Heritage, territory and city

Resumen/Laburpena/Summary

En los últimos años, se han realizado numerosos estudios sobre caídas de rocas y sus impactos, tanto a nivel económico como social. En este trabajo, se han analizado los diferentes tipos de inestabilidades y caídas de rocas de los acantilados costeros en la zona de Zumaia (Gipuzkoa, País Vasco). En primer lugar, se han correlacionado las distintas litologías de los acantilados con el tipo de inestabilidades que sufren, tomando medidas de planos de discontinuidad y realizando proyecciones estereográficas. Se ha generado un modelo digital del terreno (MDT) a partir de un vehículo aéreo no tripulado o dron (VANT), del que se ha obtenido una nube de punto tridimensional y ha servido de base para realizar una topografía de detalle. Se han utilizado varios programas de simulación de caída de rocas, que elaboran modelos en dos y tres dimensiones. El área de estudio forma parte del Geoparque de la Costa Vasca, y su franja litoral está protegida desde el año 2009. Los resultados permitirán que el Geoparque pueda, a partir de este estudio, adoptar una serie de medidas de seguridad adecuadas a los resultados calculados, con el objetivo de delimitar zonas peligrosas, o de advertencia, para las diferentes actividades realizadas en el mismo.

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea