XI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables
Bilbao, julio 2025
M. Hürlimann y N.M. Pinyol
CIMNE, Barcelona, 2025

MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS Y SU APLICACIÓN REAL EN LA GESTIÓN DE LADERAS, TALUDES Y RELLENOS

Rodrigo I. ALEXANDER [(1)], Martínez S. ION [(1)] y Rodríguez D. JOSU [(2)]

[(1)] Departamento de Geotecnia
TYPSA Euskadi
arodrigo@typsa.es, imartinez@typsa.es

[(2)] Responsable geología-geotecnia ETS
Euskal Trenbide Sarea
jrodriguez@ets-rfv.eus

RESUMEN

La metodología de análisis, control y seguimiento de los elementos geotécnicos de la red ferroviaria de Euskal Trenbide Sarea (ETS) se viene desarrollando en los últimos años en base a las inspecciones visuales periódicas y el análisis geoestadístico de los deslizamientos, representado por el mapa de susceptibilidad. Esta metodología contribuye a delimitar futuros escenarios de inestabilidad y mitigar sus efectos, para así facilitar la funcionalidad de la infraestructura a la máxima disponibilidad posible. El mapa de susceptibilidad de deslizamientos en la red de ETS muestra la probabilidad de ocurrencia de cualquier tipo de inestabilidad, e integra tanto las variables explicativas de los deslizamientos, establecidas mediante técnicas de inferencia estadística, como la influencia de fenómenos detonantes de escorrentía superficial o socavación fluvial. Del mapeo de los elementos inventariados y su nivel de aceptación se derivan y optimizan las tareas de conservación tales como, frecuencias de inspección, elaboración de estudios exhaustivos o proyectos de rehabilitación y mejora.

1. INTRODUCCIÓN

La red ferroviaria de Euskal Trenbide Sarea (ETS) tiene una longitud aproximada de 200 km, y discurre a lo largo de los territorios históricos de Bizkaia y Gipuzkoa, de los cuales, cerca de tres cuartas partes discurren en superficie y el resto en túnel en mina o en falsos túneles.

A finales del primer trimestre de 2023 finalizaron los trabajos para el inventario de taludes de Euskal Trenbide Sarea, Lote 1: Bizkaia y Lote 2: Gipuzkoa, llevados a cabo por TYPSA, a partir de los cuales se inventariaron, geolocalizaron y catalogaron 403 taludes, describiendo con detalle sus características geométricas, geotécnicas, el estado de las estructuras de contención, así como se evaluó su estado general. En función de la clasificación los taludes se han instrumentado o realizado diversos estudios exhaustivos sobre aquellos que presentaban un estado no aceptable. La conclusión de los trabajos de inventario fue el de someter a los taludes de la red ferroviaria a una serie de inspecciones periódicas, recomendándose inspecciones en base a la clasificación de su estado.

En una nueva fase, a finales del año 2023, se ampliaron los objetivos para incluir otros elementos geotécnicos como los rellenos de plataforma, a la vez que se incluyeron Proyectos de Rehabilitación y Mejora de los taludes catalogados con un estado de deterioro, y en especial, de aquellos en los que se realizaron estudios exhaustivos. También se introdujo la identificación y evaluación de potenciales

riesgos de carácter geológico-geotécnicos que puedan tener su origen fuera del dominio ferroviario actual, como laderas de alto desarrollo o áreas fuente de derrubios o bloques alejadas de la vía. Con este objetivo se elabora una metodología que incluye el análisis de la geoinformación obtenida de diversas fuentes, tanto de la disponible en las infraestructuras de datos espaciales, la elaborada durante las inspecciones, inventario y estudios exhaustivos de la red, y la histórica a partir de los estudios realizados por ETS, así como se realiza un tratamiento estadístico de todas ellas, para así generar un Mapa de susceptibilidad que delimite geográficamente la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

Estos trabajos se desarrollan en el ámbito del contrato "Servicio para la inspección y gestión periódica de los elementos geotécnicos de la plataforma a cielo abierto de la red ferroviaria de Euskal Trenbide Sarea" y que lleva a cabo la delegación territorial de TYPSA Euskadi.

2. METODOLOGÍA GENERAL

Los mapas de susceptibilidad a deslizamientos representan un buen elemento de planificación y ayuda de cara a priorizar las actuaciones preventivas a desarrollar. La herramienta principal de trabajo se basa en los sistemas de información geográfica, ya que constituye el instrumento perfecto para la identificación, organización, cálculo y mapeo de diversos elementos y procesos, permitiendo la visualización, extracción, almacenamiento y procesamiento rápido de grandes volúmenes de geoinformación.

Dichos trabajos se caracterizan por su importante carácter preventivo, ya que las áreas de estudio se sitúan habitualmente fuera de las zonas de control rutinario de la propia red, como son las laderas, caminos vecinales u otras infraestructuras, que normalmente corresponden con terrenos de terceros y alejados del trazado.

El proceso de trabajo esta caracterizado por una simbiosis entre las técnicas estadísticas y las técnicas convencionales de investigación y cálculo desarrolladas para los trabajos geotécnicos habituales. Dicha metodología consiste principalmente en elaborar un Mapa de susceptibilidad de deslizamientos en una banda de 500 m a cada lado de la red ferroviaria de ETS (variable según condiciones del relieve), que analice la probabilidad de ocurrencia de eventos de inestabilidad del terreno que puedan afectar a su dominio.

Las características propias de la circulación ferroviaria como la velocidad del tramo y la frecuencia de circulación se integran en un Mapa de vulnerabilidad, donde quedan georreferenciados y clasificados aquellos tramos de vía que son más sensibles a una incidencia de tipo geotécnico, ya que el tiempo de respuesta juega un papel fundamental en la prevención de incidencias. A partir de la combinación del Mapa de susceptibilidad y el Mapa de vulnerabilidad se extrae el Índice de fragilidad del tramo, que representa la probabilidad de ocurrencia y el grado de afección de un evento de inestabilidad.

Con el fin de incorporar al modelo de probabilidad, los datos obtenidos de las inspecciones y estudios de campo, se incluye el denominado Estado del elemento geotécnico, que define el nivel de aceptación del talud o relleno estudiado. Se incluye en esta valoración datos como las características geotécnicas, patologías detectadas, la comprobación de la información histórica, el seguimiento y análisis de la auscultación, la revisión de incidencias y su recurrencia, o el análisis de su evolución.

A partir de la combinación del Estado del elemento geotécnico y el Índice de fragilidad se obtiene la valoración final del elemento o Índice de pérdida, que representa la herramienta a través de la cual se deriva el plan de inspecciones y el protocolo de actuación para cada nivel de aceptación, y concentra los aspectos más relevantes para la buena gestión de la infraestructura.

3. ÁREA DE ESTUDIO Y ENCUADRE GEOLÓGICO

El área de estudio comprende toda la línea de ETS (220 km), de los cuales 65 km son de vía doble y los restantes 134 km de vía única. Incluyendo la banda de estudio a cada lado de la línea se han analizado unos 188,6 km^2 de superficie. La red está distribuida fundamentalmente en las siguientes líneas: 1.- Línea Bilbao – Donostia; 2.- Tranvía Tramo Atxuri – Kukullaga; 3.- Ramal Amorebieta – Bermeo; 4.- Línea Donostia – Hendaia; 5.- Línea 3 – Txorierri; 6.- Línea Lutxana – Sondika; 7.- Línea Basurto – Ariz; 8.- Línea Irauregui- Lutxana; 9.- Línea Azpetia – Lasao; 10.- Ramal Lasarte; 11.- Funicular de Larreineta.

Dadas las diferencias de relieve del área de estudio, las principales infraestructuras de transporte se sitúan generalmente en los fondos de los valles y discurren a lo largo de las zonas con menor desnivel a salvar, por lo que la mayoría se encuentran aglutinadas y en frecuentemente muy próximas a los cursos fluviales principales. El control de dichos trazados es básicamente geomorfológico y geológico, y discurre generalmente de forma paralela a la estructura tectónica principal.

Geológicamente se sitúa en la Cuenca Vasco Cantábrica, y más concretamente el trazado de la línea ferroviaria se encuentra íntegramente en el denominado Arco Vasco (Feuillée y Rat, 1971; Serrano y Martínez del Olmo, 1990), caracterizado por presentar potentes sucesiones sedimentarias cretácicas y terciarias, mayoritariamente de condiciones marinas abiertas, e importantes acumulaciones turbidíticas, con un predominio de materiales tipo flysch.

4. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

Se ha elaborado un Mapa de Susceptibilidad al deslizamiento de todo el entorno de la red ferroviaria, que delimita las áreas potencialmente inestables y muestra una estimación de dónde se espera que ocurran. Este mapa se basa en los datos recopilados del Inventario de inestabilidades elaborado por TYPSA, cuya geoinformación incluye las incidencias relevantes ocurridas en infraestructuras de transporte (carreteras y ferrocarriles) y de áreas próximas, en los territorios históricos de Bizkaia y Gipuzkoa, desde el año 2008 hasta la actualidad, y que está en continuo desarrollo.

Para llegar a dicho objetivo se ha utilizado una técnica de inferencia estadística, en concreto la regresión logística binaria (RLB), mediante la cual se utilizan diferentes tipos de variables predictivas para definir la ocurrencia o no de un suceso. Para ello se han seguido una serie de actuaciones específicas:

- Recopilación, geolocalización, caracterización y elaboración de una base de datos de deslizamientos, integrándolos en un inventario de inestabilidades dinámico y actualizable.
- Selección de un número elevado de incidencias (~400 Ud.) en las que los datos agregados geoambientales están cuantificados y valorados según criterios del ALISSA (Abridged Landslide Inventory of Spain for synoptic Susceptibility Assessment) (Hervás, 2013).
- Elaboración y análisis de la cartografía geológico-geotécnica reflejando las variables a tener en cuenta para estimar la susceptibilidad del terreno frente una inestabilidad.
- Retroalimentación del modelo de regresión con nuevas variables que permitan un mejor ajuste del cálculo de la susceptibilidad.

El software de cálculo estadístico utilizado ha sido IBM SPSS Statistics 23.0, integrando los resultados y generando cada mapa con QGIS Desktop 3.26.2. Para la visualización, control y seguimiento de los elementos geotécnicos una vez establecidas las valoraciones se utiliza la plataforma para ingeniería civil de Civilnova Solutions S.L.

Se han incluido en el modelo diferentes tipos de materiales, tantos macizos rocosos en diferentes grados de meteorización, como suelos más o menos consolidados. Los depósitos de suelos

comprenden todas aquellas formaciones de edad reciente en términos geológicos, y que corresponden al Cuaternario. Son estos los que pueden llegar a alcanzar mayores intensidades una vez movilizados, así como mayores distancias de viaje (Finlay *et al.* 1999; Corominas, 1996).

5.1. Referencias previas

En estudios de susceptibilidad a deslizamientos, fueron los estudios de Mora *et al.* (1992) en Costa Rica los primeros que utilizaron metodologías estadísticas similares. Diversos estudios recientes a nivel europeo (Pan-European landslide susceptibility mapping: ELSUS Version 2) identifican a escala continental (pixel 200m x 200m) y en base a evaluaciones estadísticas multicriterio, una serie de regiones con una alta susceptibilidad de sufrir deslizamientos o movimientos en masa (Wilde *et al.*, 2018).

El estudio publicado por la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA, 2017) sobre las variaciones esperadas en la abundancia o actividad de los deslizamientos de tierra indica que se producirá una disminución general en abundancia/actividad de deslizamientos profundos, y un aumento en caídas de rocas, flujos de escombros y en mayor medida deslizamientos superficiales. Concretamente para la Cordillera Cantábrica y País Vasco, se prevé un aumento de los deslizamientos superficiales tipo flujo de derrubio (Gariano S. L. y Guzzetti F.,2016).

En la península ibérica se han desarrollado trabajos comparando diversas técnicas estadísticas para la evaluación de la susceptibilidad en los pirineos catalanes (Amorim *et al*., 2009). En la comunidad autónoma del País Vasco se han realizado modelos de cálculo de susceptibilidad mediante la regresión logística con capacidades de predicción muy altas en la cuenca del rio Oria (Bornaetxea *et al*., 2018) e incluyendo variables como la distancia a la red de transportes, que aportan una perspectiva análoga a los objetivos de este trabajo.

5.2. Modelo de cálculo según la regresión logística binaria

El objetivo de esta técnica estadística es expresar la probabilidad de que ocurra un hecho como función de ciertas variables. La gran ventaja de la regresión logística es que da la posibilidad de evaluar la influencia de cada una de las variables independientes, ya sean cuantitativas o categóricas, sobre la variable respuesta, y controlar el efecto del resto dentro del conjunto.

Para el procesamiento, cálculo y generación de los mapas se seleccionan previamente los principales factores o variables que pueden intervenir en la susceptibilidad al deslizamiento de origen natural. Este conjunto de variables se puede dividir en dos grupos: variables independientes, propiedades o factores que se supone es la causa del fenómeno estudiado, tiene carácter predictor y su valor no depende de otra variable; y variables dependientes, factor que es observado y medido, cuyo valor depende de los valores que tomen las variables independientes. En este caso de estudio la variable dependiente corresponde con la ocurrencia (Si) o no (No) de una inestabilidad.

A su vez, en términos de medida, se pueden distribuir en: variables cuantitativas, toman un valor numérico, en este subgrupo hay variables discretas (1, 2, 3…), con implicación de ausencia de valores intermedios, y variables continuas, que pueden adquirir cualquier valor dentro de un intervalo especificado de valores (1,50; 4,30…); variables cualitativas, expresan una característica o atributo. También se les denomina variables categóricas. Pueden ser de clasificación dicotómica (binaria) o politómica (más de dos categorías).

Toda la información se procesa a través de un sistema de información geográfica, que utiliza cada una de las entradas de información como capas independientes que se superponen para generar nuevos mapas con informaciones cruzadas y datos agregados.

El Mapa de Susceptibilidad de deslizamientos se ha elaborado mediante la regresión logística que queda expresada mediante la Ecuación 1. Para ello se han estudiado los factores o propiedades, en términos estadísticos, que pueden intervenir en la ocurrencia de los deslizamientos.

$$\rho = \frac{e^{b_0+b_1X_1+\cdots+b_kX_k}}{1+e^{b_0+b_1X_1+\cdots+b_kX_k}} \quad (1)$$

De esta manera, se integran todos aquellos factores geoambientales naturales existentes en la IDE del País Vasco (Geoeuskadi), así como los cartografiados durante las inspecciones periódicas de la vía y alrededores, para así poder extraer las variables más significativas y condicionantes para los procesos de inestabilidad del terreno. Las variables recogidas en una primera fase se distinguen según 3 grandes grupos: variables del relieve, como la curvatura de la ladera, rugosidad y pendiente; variables geológicas-geomorfológicas, como la litología, geomorfología, y el espesor de suelos (regolito); y la variable cobertera superficial, que agrupa el tipo de vegetación y el uso del suelo.

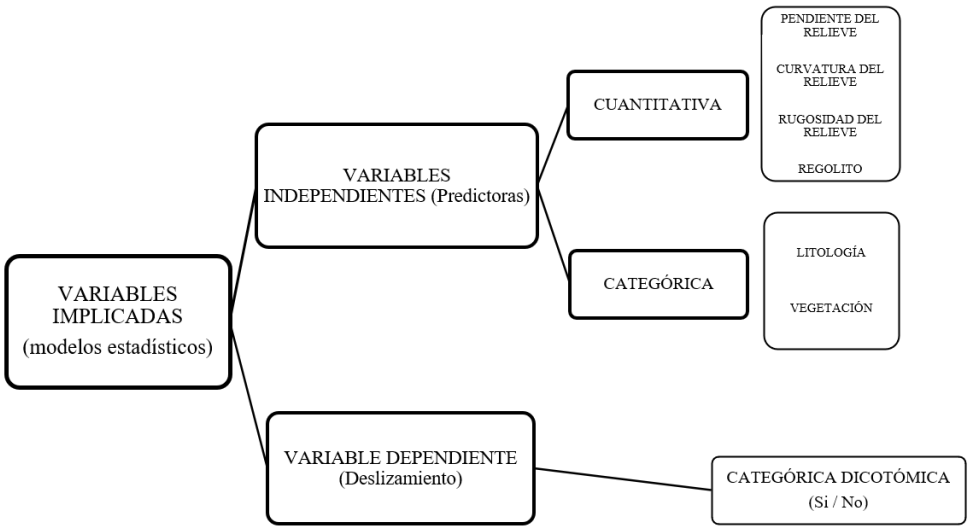


Figura 1. Variables introducidas en el modelo

Con el conjunto de variables cuantitativas y categóricas se ha realizado bloque inicial de análisis de regresión para definir aquellas que explican el evento Deslizamiento-No deslizamiento. Posteriores fases del modelo han permitido desechar variables o adaptarlas para así obtener un modelo los más parsimonioso posible, sin una pérdida de predicción importante, y que sea fácilmente integrable en una herramienta GIS.

5.3. Capacidad predictiva del modelo

Se han seguido diferentes estrategias de tratamiento de los datos en base a los resultados obtenidos del primer análisis de las variables introducidas en el modelo. Esto ha permitido elaborar un modelo, denominado de entrenamiento, lo más compacto y elemental posible, agrupando clases de similar comportamiento dentro de cada variable, para así conseguir el mayor grado de sensibilidad y especificidad sin perder información.

En términos de acierto, la sensibilidad es la proporción de positivos (deslizamientos) que pronosticamos entre los que realmente se han producido (observados). Evidentemente interesa un modelo con alta sensibilidad, donde la mayor parte de los deslizamientos se pronostiquen correctamente. Por otro lado, la especificidad mide la proporción de negativos (no deslizamientos) pronosticados entre los que realmente no se han producido. Interesa, por tanto, que las zonas que se consideren estables según el pronóstico sean realmente estables.

En el modelo final se han tomado las siguientes estrategias: se han definido dos variables

cuantitativas que son, la Pendiente y el espesor de suelos (regolito), en las que ambas corresponden con factores de riesgo para la ocurrencia de un deslizamiento. La variable Curvatura y Rugosidad se han desechado por no presentar significancia adecuada. La transformación de la variable Regolito de categórica a cuantitativa ha permitido obtener un modelo con una mejor capacidad predictiva; las dos variables categóricas de Litología y Vegetación se han condensado cada una de ellas en dos clases (dicotómica), atendiendo al comportamiento de cada clase individual; las diferentes clases litológicas se han agrupado en dos, Suelos-roca meteorizada y Roca, atendiendo a los coeficientes B, ya que ejercen un efecto dispar; las tres clases principales de Vegetación se han agrupado en dos, vegetación poco desarrollada como los prados y zonas de matorral por un lado, y bosques-explotaciones forestales por el otro).

Según el coeficiente de regresión (B con signo positivo), la Pendiente, Regolito, la clase Suelos (frente a roca) y la clase Prados (frente a vegetación desarrollada como los bosques), corresponden con factores de riesgo (Tabla 1).

Tabla 1. Variables consideradas y pruebas estadísticas del modelo final

Variables	B	Error STD.	Sig.	Exp (B)	95% C.I. para EXP (B)	
					Inferior	Superior
Pendiente	0,171	0,019	0,000	1,186	1,144	1,231
Regolito	0,621	0,150	0,000	1,860	1,386	2,498
Litología	1,369	0,515	0,008	3,932	1,433	10,784
Vegetación	1,848	0,429	0,000	6,349	2,739	14,716
Constante	-8,706	0,982	0,000	0,000		

La regresión logística binaria proporciona una distribución continua de probabilidad de deslizamiento entre 0 y 1, mientras que las posibilidades reales son exactamente 0 o 1. Si en el modelo se considera que el valor que discrimina entre la ocurrencia o no del deslizamiento es de 0,5 (rango de 0 a 1), este considerará que con un valor inferior a 0,5 no se producirá deslizamiento, y un valor superior a 0,5 sí se producirá. Entonces, el número total de aciertos vendrá condicionado por el criterio tomado, en definitiva, el punto de corte.

En un contraste del modelo contra sí mismo, la comparación del resultado para cada individuo con los valores reales observados en la muestra proporciona una primera valoración de aciertos en la predicción del porcentaje de diagnósticos correctos. La manera apropiada de estimar el acierto del modelo consiste en representar los resultados cruzados para una situación de corte establecida y comparar los resultados; el número total de aciertos del modelo respecto a la muestra, para un punto de corte de 0,5 es de 92,4%. La sensibilidad es de 91%, obteniendo 18 falsos negativos de entre 200; y una especificidad de 93,8%, obteniendo 12 falsos positivos de entre 194 (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación del diagnóstico con punto de corte 0,5

Observado		Pronosticado		
		Deslizamiento		Porcentaje correcto
		NO ocurre	SI ocurre	
Deslizamiento	NO ocurre	182	12	Especificad
	SI ocurre	18	182	Sensibilidad
Porcentaje global de acierto				92,4

Los valores de acierto obtenidos son relativos, ya que dependiendo del interés del investigador para obtener determinados valores de sensibilidad y/o especificidad, se puede modificar el punto de corte a partir del cual se discrimina una población pronosticada de otra. El balance óptimo de discriminación de falsos positivos y falsos negativos para este modelo corresponde con este punto de corte (0,5).

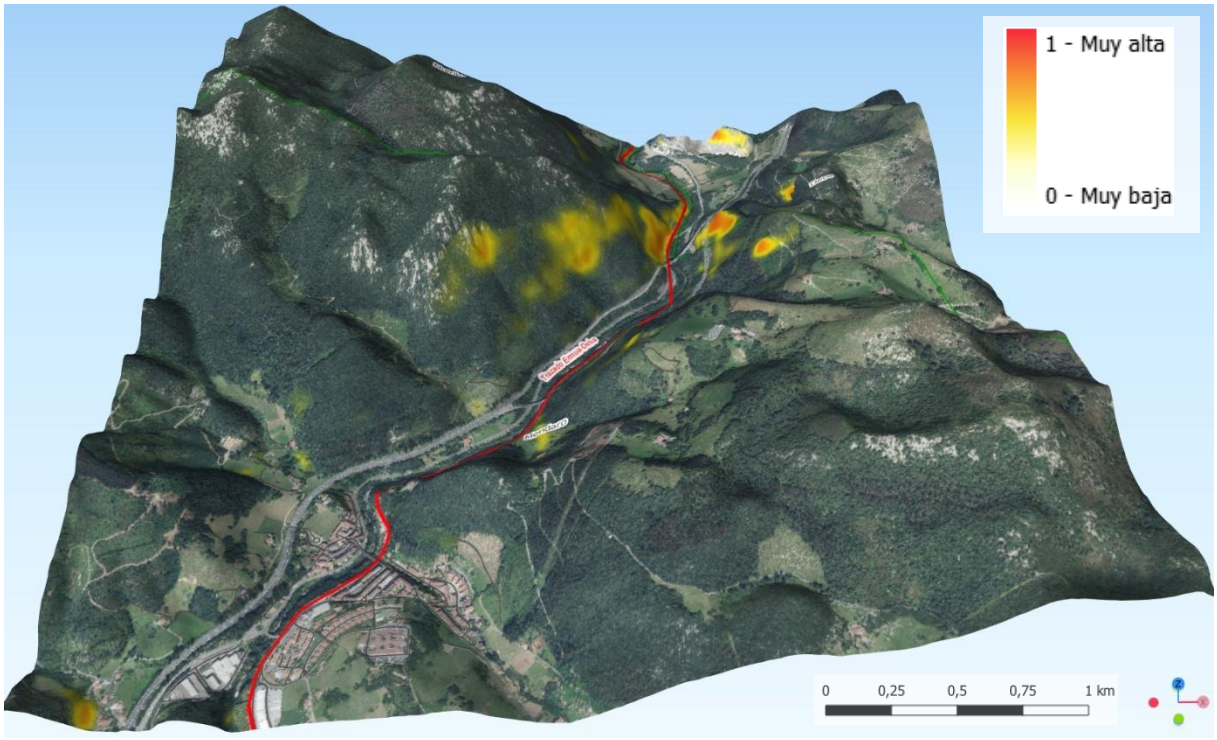


Figura 2. Detalle del mapa de susceptibilidad en el trazado BI-DO entre Mendaro y Deba

5.4. Comprobación y validación de los modelos

Las curvas ROC (Receiver Operating Characteristic) o área bajo la curva (ABC) es la visualización grafica del análisis de todos los posibles puntos de corte y representa los pares (1-especificidad, sensibilidad) de cada uno de ellos. Se convierte en un indicador de la capacidad predictiva del modelo, siendo utilizada para la comparación de diferentes modelos de predicción.

Cuantitativamente, un ABC de 0,894 para el modelo del mapa elaborado mediante RLB con un punto de corte de 0,5 ofrece el mejor rendimiento. Con el fin de comparar el valor predictivo del modelo de RLB, con otros puntos de corte y con otras metodologías probadas, se han obtenido los resultados de la discriminación de grupos. Con un ABC de 0,816 para el mapa resultante mediante el método RLB con corte en 0,15, presenta una capacidad de acierto muy buena, incluso superior al de un modelo mediante el sumatorio lineal ponderado SLP de las variables influyentes, y elaborado como técnica comparativa simple en una fase inicial de los trabajos.

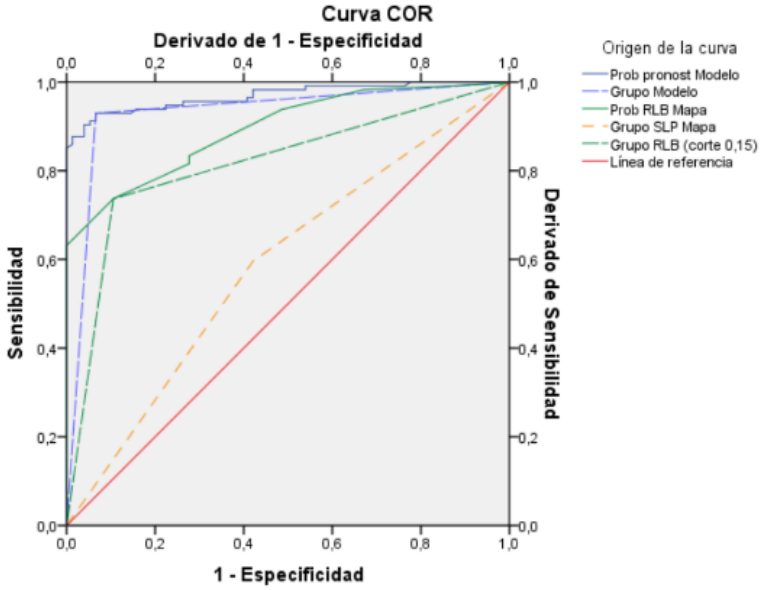


Figura 3. Curvas ROC para muestra de entrenamiento (Prob pronost Modelo) y validación (Grupo Modelo), color azul.

5.6. Otros fenómenos naturales introducidos en el mapa de susceptibilidad

Se han analizado dos fenómenos que en numerosas ocasiones generan afecciones a la línea ferroviaria. El primero está relacionado con los aportes de agua indiscriminados y no controlados provenientes de arroyos o caminos próximos a la red, que se suelen dar durante periodos de fuertes precipitaciones y que pueden llegar a inundar la plataforma, generar arrastres, o crear inestabilidades por saturación del terreno.

El primer paso consiste en extraer la red de drenaje y sus vectores de flujo, incluyendo el número de orden según Strahler en función de la jerarquía de los afluentes (Strahler, 1957). El método de cálculo utilizado consiste es el tratamiento de la Geoinfomación existente en Geoeuskadi, a partir del complemento SAGA en QGIS. Se han extraído las cuencas y la red hídrica a partir de un modelo digital del terreno con tamaño de pixel 5x5m. Los vectores de flujo que interceptan a la vía se georreferencian y se condensan en áreas de influencia que posteriormente son evaluados.

Otro fenómeno que a menudo genera aportes de agua incontrolado es la circulación de agua a través de los caminos y/o pistas forestales próximas a la vía. Para su análisis se han extraído aquellos caminos y/o pistas que tienen una pendiente longitudinal hacia la vía y que drenan longitudes de terreno mayores de 150 m. A partir del análisis de diferencia de cota del terreno a lo largo del trazado y sus vectores de flujo se puede determinar si dicho trazado puede o no aportar una escorrentía sobre la red ferroviaria.

El segundo fenómeno incluido en el modelo se produce a partir de las redes principales de drenaje natural, pudiendo provocar la socavación del terreno o afectar a las estructuras allí donde golpean con mayor fuerza, ya sea durante avenidas importantes o donde se desarrollan flujos permanentes. El tratamiento para el análisis de las posibles socavaciones implica un trazado de vía gemelo y próximo a cauces que se dispongan de forma subparalela y a similar cota. Dado que los fenómenos de socavación implican unos caudales e intensidades de corriente importantes se han extraído y analizado aquellos cauces con número de Strahler superior a 2.

Tanto para los fenómenos de socavación como para los aportes incontrolados de agua a la línea ferroviaria se han definido 5 áreas de influencia desde el eje del cauce, espaciadas 20 m, cada una de las cuales tiene un peso mayor (de 0 a 1) respecto al eje del flujo preferente. La extracción de los tramos de cauces que interfieren con la línea y por tanto pueden llegar a afectarla, se han obtenido a partir de la superposición vectorial mediante intersección múltiple.

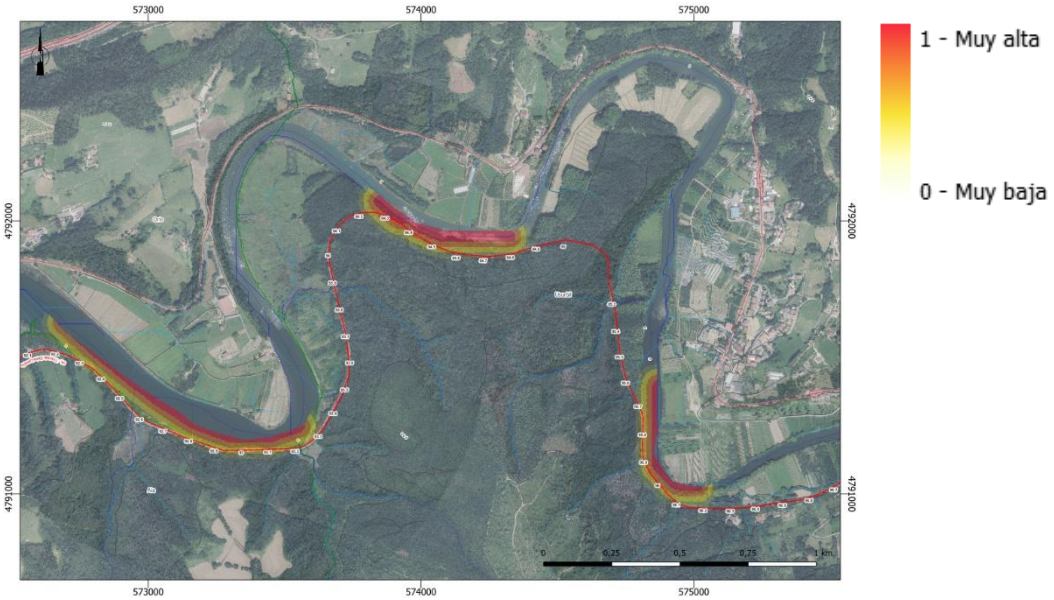


Figura 4. Áreas de influencia por socavación en meandros en el trazado BI-DO entre Orio y Usurbil.

5. ESTADO DEL ELEMENTO GEOTÉCNICO

Para evaluar el estado de un elemento geotécnico, ya sea un talud o un relleno, se realizan una serie de valoraciones y análisis extraídos de las inspecciones visuales periódicas o de los estudios exhaustivos. Estos análisis incluyen datos como las características geotécnicas, patologías detectadas, la comprobación de la información histórica, el seguimiento y análisis de la auscultación, la revisión de incidencias y su recurrencia, o el análisis de su evolución.

El objetivo final de esta clasificación es realizar una evaluación de las condiciones de estabilidad del elemento inspeccionado en campo, incluyendo un análisis de sus características y elementos que contiene, así como el estado de conservación de estos. Dicho análisis se refleja en una puntuación final para cada elemento, y este queda georreferenciado en un mapa inventario, en el que cada elemento corresponde con una superficie concreta con un valor establecido. Este valor presenta 5 niveles de aceptación, resultado de la puntuación de diferentes parámetros.

Las puntuaciones que se asignan a cada parámetro a observar se determinan en base a los criterios resumidos en la Tabla 3:

Tabla 3. Valoración cuantitativa de puntuación para los elementos inspeccionados en un talud/relleno

Inspección visual. Criterios de evaluación cuantitativa		
Descripción	Puntuación	Estas puntuaciones indican la valoración y desarrollo de cualquier criterio y aspecto analizado. Por ejemplo, si en un relleno, en torno al 40% de la superficie presenta deformaciones, se asigna un valor de 3. Esto se aplica a todos los factores de observación.
Nula / inexistente	-	
Baja (5-15%) * / Ocasionales	1	
Moderada (15-30%) * / Frecuentes	2	
Significativas (30-50%) * / Abundantes	3	
Muy importantes (›50%) * / Muy abundantes	4	
Severo (>70%) / Generalizado	5	

La evaluación del estado de un elemento y la clasificación final se basa en las puntuaciones obtenidas aplicando el criterio anterior y únicamente teniendo en cuenta los factores internos o propios del talud o relleno, y centrada en los siguientes aspectos:

- El estado del talud o relleno
- El estado de las estructuras de sostenimiento o refuerzos existentes
- El estado de la plataforma
- Datos obtenidos de la auscultación

Los fenómenos o indicadores más relevantes y que toman mayores implicaciones sobre el Estado del elemento geotécnico son:

- La presencia de bloques abiertos y su peligrosidad (volumen, distancia de viaje, velocidad)
- La estructura del macizo rocoso (características de las discontinuidades, orientación, etc.)
- El espesor y tipo de suelo
- La existencia de grietas y deformaciones en el elemento
- La presencia de cicatrices de caídas recientes
- Fenómenos de erosión diferencial o acarcavamientos
- Presencia de agua
- Vegetación de riesgo en caso de caída o perjudicial

Las puntuaciones asignadas a cada indicador se ponderan y corrigen según pesos específicos en base a su relevancia sobre la estabilidad del elemento. Con estas correcciones se obtiene una puntuación corregida sobre un máximo posible que varía para cada talud o relleno en base a sus características.

4.1 ESTADO DEL DESMONTE	Puntuación	Peso esp.	Puntuac. corregida	Descripción
Bloques de roca sueltos o material en la cara del talud sin riesgo de alcanzar la vía.	-	75	-	Talud derecho en curva de 5 a 10 m de altura en 1H:3V en alternancia de margas y caliza arenosa. Las calizas arenosas generan cuñas y bloques centimétricos a decimétricos mientras que las margas favorecen el chineo. Abundan las juntas abiertas generando lascas y bloques decimétricos. Bloques decimétricos acumulados a pie de talud a lo largo del tramo. Final de tramo en 2 m de altura y 1H:2V, con tala de entidad de árbol.
Bloques de roca sueltos o material en la cara del talud con riesgo de alcanzar la vía.	-	100	-	
Bloques de roca sueltos o material acumulado en cuneta de pie.	3	75	2.25	
Juntas abiertas o planos de estratificación descalzados o volcados.	3	100	3	
Grietas en la cara del talud.	-	100	-	
Grietas en la coronación del talud.	-	100	-	
Deformaciones en la cara del talud.	-	100	-	
Cicatrices de caídas recientes.	3	100	3	
Fenómenos de erosión o acarcavamientos.	-	75	-	
Zonas de humedad o fluencias de agua.	-	50	-	
Vegetación intensa.	-	100	-	
Erosión diferencial.	-	75	-	
PUNTUACIÓN (P) TOTAL	**9**		8.25	
PUNTUACIÓN MÁXIMA POSIBLE	**15**		13.75	

Figura 5. Ejemplo de análisis y puntuaciones referidas al apartado estado del desmonte donde se observan los factores de riesgo asociados al talud.

Para subdividir el Estado del talud o relleno se incluyen 2 rangos de puntuaciones (P) diferentes, en función del número de criterios que se evalúen en un talud. De esta manera, cuando se evalúan menos de 5 criterios en el total de la inspección, es decir, la puntuación máxima posible sea igual o menor que 25, se establece un rango de valores para la subdivisión del estado, por el contrario, cuando se evalúen más de 5 factores en total, es decir, la puntuación máxima posible sea superior a 25, se propone otro rango de valores de puntuación (P) para la subdivisión del estado del talud. En la Tabla 4 se muestra la clasificación de los niveles del estado de un elemento, y su relación con las puntuaciones obtenidas:

Tabla 4. Niveles de estado del elemento geotécnico y los rangos de variación en función la puntuación

Si P máx. ≤ 25 (≤5 factores puntuados)	Si P más > 25 (> 5 factores puntuados)	Niveles de Estado
(P) ≤ 30 % (máx.)	(P) ≤ 20 % (máx.)	Bueno
30% < (P) ≤ 45 % (máx.)	20% < (P) ≤ 30 % (máx.)	Admisible
30% < (P) ≤ 60 % (máx.)	30% < (P) ≤ 40 % (máx.)	Con defectos
60% < (P) ≤ 80 % (máx.)	40% < (P) ≤ 60 % (máx.)	Deterioro
(P) > 80 % (máx.)	(P) > 60 % (máx.)	Crítico

El objetivo de esta valoración es evitar que las puntuaciones altas de algún factor o las valoraciones de muchos factores no oculten o sobrevaloren la valoración final.

6. ÍNDICE DE PÉRDIDA

Con el objetivo de elaborar un plan de inspecciones y un protocolo de actuación para cada nivel de aceptación del elemento geotécnico se establece el denominado Índice de pérdida, que concentra los aspectos más relevantes para la buena gestión de la infraestructura, y se basa en la interacción de los mapas parciales generados en cada fase de estudio. De esta manera su incluyen en la valoración final, el Mapa de susceptibilidad al deslizamiento, el mapeo de las zonas de escorrentía superficial y socavación fluvial, el mapeo de las zonas vulnerables de la vía basadas en las características de la circulación, y el mapeo del Estado del elemento geotécnico.

Por un lado, para incorporar los fenómenos eventuales de socavación fluvial (Socav.) y escorrentía superficial (Escor.) al Mapa de susceptibilidad a deslizamientos (Sucept) se ha incluido el concepto de Mapa de Susceptibilidad Integral, que pondera las variables parciales según la Ecuación (2). Este Mapa se clasifica en base a 5 niveles que van de 0 al 1.

$$\text{Susceptibilidad Integral (Suscept. Int.)} = 0{,}70 \text{ x Suscept} + 0{,}15 \text{ x Socav} + 0{,}15 \text{ x Escor} \quad (2)$$

Por otro lado, el Mapa de Vulnerabilidad de la propia vía, que introduce conceptos o variables intrínsecas de la vía o de un tramo de vía. Cuantifica qué tramos de vía están más expuestos o

están más comprometidos si se da un evento de inestabilidad y se produce algún tipo de daño o cualquier corte del servicio. Este se basa en dos factores, la frecuencia de circulación (Frec.) y la velocidad de circulación (Veloc.), divididos cada uno en 5 niveles de vulnerabilidad parcial según la clasificación de la Tabla 5.

Tabla 5. Niveles de vulnerabilidad en base a frecuencia y velocidad en el tramo de vía

Frecuencia (min.)	Velocidad (km/h) tramo	Niveles de vulnerabilidad
<15	>80	Muy alta
15	70-80	Alta
30	60-70	Moderada
60	50-60	Baja
>60	<50	Muy baja

El mapa resultante se clasifica a su vez en 5 niveles y es producto de la Ecuación (3).

$$\text{Vulnerabilidad} = 0{,}7 \text{ x Veloc} + 0{,}3 \text{ x Frec} \quad (3)$$

A partir de la combinación del Mapa de Susceptibilidad Integral y el Mapa de Vulnerabilidad se extrae el denominado Índice de fragilidad del tramo según la Ecuación (4):

$$\text{Índice de Fragilidad} = 0{,}4 \text{ x Suscept. Int.} + 0{,}6 \text{ x Vulnerabilidad} \quad (4)$$

La valoración final del talud o relleno en base a los factores externos e internos queda definida mediante el denominado Índice de pérdida. Este mapa es el resultado de la evaluación del elemento y el Índice de fragilidad, y se clasifica en 5 niveles y se define según la Ecuación (5):

$$\text{Índice de pérdida} = 0{,}4 \text{ x Índice de Fragilidad} + 0{,}6 \text{ x Estado Talud/Relleno} \quad (5)$$

7. PLAN DE INSPECCIONES Y PROTOCOLOS DE ACTUACIÓN

A partir de las sucesivas inspecciones de campo y del Índice de pérdida se extraen los aspectos que han podido variar en el elemento geotécnico y en el entorno, tanto los que corresponden con factores de riesgo como pueden ser talas en explotaciones forestales del entorno, como los factores de protección, como pueden ser refuerzos ejecutados o mejoras de drenaje. Para clasificar estas variaciones temporales se han definido 4 tipos de cambios:

- Mejora (M): existen actuaciones de mejora de la estabilidad.
- Sin Cambios (SC): el índice de pérdida actual es coincidente con el previo.
- Ligero deterioro (LD): el índice de pérdida actual asciende a un nivel superior.
- Severo deterioro (SD): el índice de pérdida actual asciende a varios niveles superiores.

Las tareas definidas para cada Índice de pérdida y variaciones de nivel durante las sucesivas inspecciones se definen en base a la matriz de decisión de la Tabla 6.

Tabla 6. Frecuencia de inspección y tareas derivadas según el Plan de actuaciones

(*P.C: Proyecto constructivo; E.E: Estudio Exhaustivo)

Índice de pérdida	Mejora (M)	Sin Cambios (SC)	Ligero Deterioro (LD)	Severo Deterioro
Muy bajo	6 años	6 años	5 años	3 años
Bajo	5 años	5 años	3 años	2 años
Moderado	5 años	3 años	2 años	Redacción PC o EE*
Alto	3 años	2 años	Redacción PC o EE*	EE* Act. Emergencia
Muy alto	2 años	1 año	EE* Act. Emergencia	EE* Act. Emergencia

Analizar la evolución del Índice de pérdida respecto a inspecciones anteriores es determinante para estimar el comportamiento del elemento geotécnico en el tiempo.

Así mismo, es posible comprobar de manera ágil en qué aspecto ha podido variar (fallo del sostenimiento, cambios externos, etc.), ya que en todo momento quedan registrados y geolocalizadas las características y variables que influyen en la evaluación del elemento.

12. CONCLUSIONES

La metodología de análisis, control y seguimiento de los elementos geotécnicos desarrollada para la red ferroviaria de Euskal Trenbide Sarea permite entre otras cosas:

- Identificar y evaluar áreas potenciales de riesgo de carácter geológico-geotécnico que puedan tener su origen fuera del dominio ferroviario, como laderas de alto desarrollo o áreas fuente de coladas de derrubios o caída de bloques alejadas del trazado.
- Generar un mapa integral de susceptibilidad al deslizamiento con el fin de poder organizar los medios y revisar aquellas zonas más sensibles, así como analizar cada una de las variables que hace que puedan variar las condiciones de estabilidad del entorno y del propio elemento geotécnico.
- Identificar, organizar, calcular y mapear de diversos elementos y procesos, permitiendo la visualización, extracción, almacenamiento y procesamiento rápido de grandes volúmenes de geoinformación, tanto histórica como actual.
- Planificar las inspecciones de vía en base a una valoración que integra los factores internos y externos del elemento geotécnico.
- Planificar y priorizar actuaciones de mejora y optimizar las inversiones en base a su eficacia.

REFERENCIAS

Amorim, S., Corominas, J., Lantada, N., Baeza, C., Portilla, M., Angulo, C. (2009). Análisis comparativo de técnicas estadísticas y de aprendizaje para evaluar la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos superficiales en el Pirineo catalán. In: E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.), *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Barcelona, pp. 737-748

Bornaetxea, T., Antigüedad, I., Ormaetxea, O. (2018). Mapas de susceptibilidad de deslizamientos a partir del modelo de regresión logística en la cuenca del río Oria (Gipuzkoa). Estrategias de tratamiento de variables. *Cuaternario y Geomorfología*, 32 (1-2), pp. 7-29

Corominas, J., 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: pp. 260–271.

European Environment Agency, EEA, 2017. Expected variations in abundance or activity of four landslide types, driven by the projected climate change. European Environment Agency's home page.

Feuillée, P. and Rat, P. (1971). Structures et paléogéographies pyrénéo-cantabriques. In: J. Debyser, X. Le Pichon and L. Montadert (Eds.): *Histoire Structurale du Golfe de Gascogne*. Publications de l'Institut Français du Pétrole, Collection Colloques et Séminaires 22(2), pp. 1–48. Ed. Technip, Paris.

Finlay, P.J., Mostyn, G.R., Fell, R. (1999). Landslide risk assessment: prediction of travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, 36: pp. 556–562

Gariano, S. L., Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. Earth-Science Reviews 162: pp. 227–252.

Hervás, J., 2013. Landslide Inventory. In: Bobrowsky, P.T. (Editor) *Encyclopedia of Natural Hazards. Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, pp. 610-611.

Mora, R., Vahrson, W., Mora, S. (1992). Macrozonificación de la amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica, *Centro de Coordinación para la prevención de desastres naturales en América Central* CEPREDENAC.

Serrano, A., y Martínez del Olmo, W., (1990). Tectónica salina en el Dominio Cántabro-Navarro: evolución, edad y origen de las estructuras salinas. En: F. Orti y J. M. Salvany (eds) Formaciones evaporíticas de las cuencas del Ebro y cadenas periféricas y de la zona de Levante. Enresa, Madrid, pp. 39-53.

Strahler, A., 1957. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. In: Transactions, American Geophysical Union, Symposium on Watershed Erosion and Sediment Yields at the Thirty-Seventh Annual Meeting, Washington, D.C, 38, pp. 913-920.

Wilde, M., Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J-P, Hervás J. (2018). Pan-European landslide susceptibility mapping: ELSUS Version 2. *Journal of Maps*, 14:2, pp. 97-104.