



Desarrollo de herramientas para prevenir y gestionar los riesgos en la costa ligados al cambio climático

## **Actividad E.2.1.2: Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la provincia de Granada**

**Informe del GT2: Cartografías de riesgo para la planificación urbanística y territorial**

**Due date of deliverable:** 30/09/2020  
**Actual submission date:** 28/09/2020

**Lead contractor for this deliverable:** IGME

### **Autores**

Cristina Reyes, Rike Mauter, Rosa María Mateos, Roberto Sarro, Eduardo Peña, Mónica Martínez, Jorge Pedro Galve, José Miguel Azañón, Agustín Millares, Marina Cantalejo, Juan Martín, Pedro Martín, Santiago Martín

Project funded by the Interreg Sudoe Programme through the European Regional Development Fund (ERDF)



## Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>DATOS PREVIOS AL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD .....</b>	<b>4</b>
2.1	Variable dependiente: inventario de movimientos de ladera .....	6
2.2	Variables independientes .....	6
2.2.1	Pendientes .....	6
2.2.2	Litologías .....	6
2.2.3	Uso del suelo .....	7
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD.....</b>	<b>9</b>
3.1	Preparación de datos .....	¡Error! Marcador no definido.
3.2	Modelo de razón de frecuencias .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3	Modelo de regresión logística .....	¡Error! Marcador no definido.
3.4	Validación .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>4</b>	<b>RESULTADOS: MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS DE LADERA .....</b>	<b>13</b>
4.1	Método FR usando datos de polígonos .....	13
4.2	Método FR frente a método LR usando datos puntuales .....	16
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>19</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

El GT2 de RISKCOAST se focaliza en el desarrollo de herramientas cartográficas de prevención de riesgos para su aplicación en la planificación del territorio y/o urbanística y planificación de emergencias. Las principales herramientas a desarrollar incluyen la creación y actualización de cartografías de susceptibilidad, peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo en las regiones costeras SUDOE, adaptada a diferentes escenarios de riesgo futuros derivados del cambio climático.

La Actividad 2.1 – Cartografía de susceptibilidad y peligrosidad del GT2 del proyecto RISKCOAST, tiene como objetivo producir mapas de susceptibilidad para los peligros relevantes en cada región costera de SUDOE, utilizando métodos estadísticos y/o deterministas, y tomando en consideración los inventarios de eventos obtenidos en GT1,

El principal objetivo de este informe técnico (E.2.1.2), que se aplica en el conjunto de la provincia de Granada (Figura 1, S España), consiste en definir una serie de metodologías para la evaluación de la susceptibilidad ligada a la ocurrencia de movimientos de ladera; métodos principalmente estadísticos que dan finalmente lugar a los mapas de susceptibilidad.

Se ha decidido analizar los movimientos de ladera por las siguientes razones:

- Están ampliamente extendidos en la provincia de Granada.
- Generan graves impactos en la costa granadina; una costa muy abrupta, sin apenas zonas de llanura debido a la cercanía de Sierra Nevada (3,465 m altura máxima).

El mapa susceptibilidad se ha realizado utilizando métodos estadísticos y utilizando inventarios e información geoespacial de bases de datos actualizadas (MOVES del IGME). Los mapas de peligrosidad se podrán realizar

posteriormente a partir del análisis de la recurrencia temporal de factores desencadenantes o de los umbrales de lluvia, a establecer en el GT4.

En el caso de los modelos estadísticos, los factores condicionantes se ponderan cruzándolos con inventarios de movimientos de ladera registrados. Los resultados se validan con curvas de éxito y predicción y el cálculo AAC (Área Bajo de la Curva).

La coordinación del GT2 está a cargo del equipo IGOT de la Universidad de Lisboa, que establece los procedimientos metodológicos para la producción de herramientas cartográficas de prevención de riesgos. La aplicación de estas metodologías a las diferentes áreas de estudio será desarrollada por cada uno de los beneficiarios participantes en el GT2.

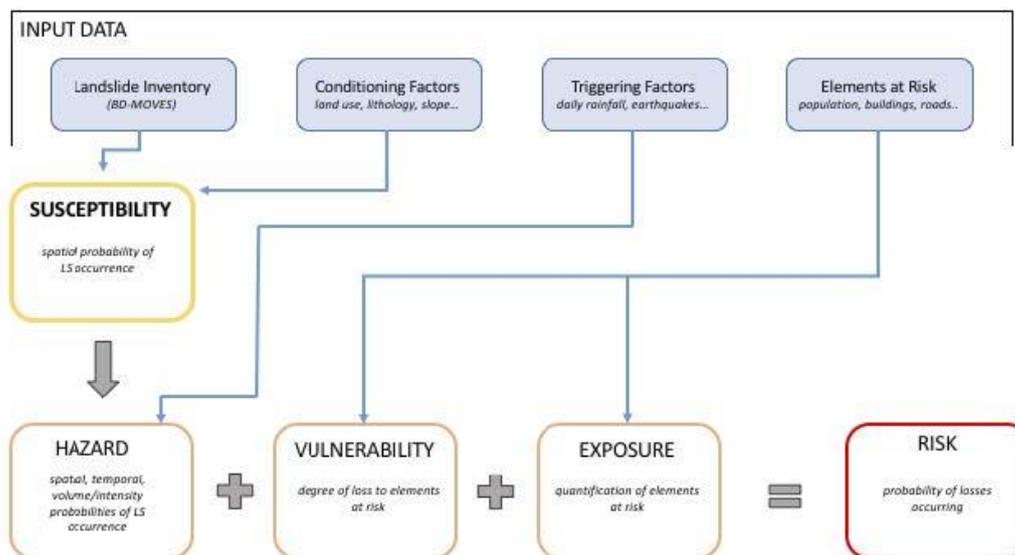


**Figura 1. Localización geográfica de la Provincia de Granada, donde se realiza el presente análisis de susceptibilidad a los movimientos de ladera**

## 2 DATOS PREVIOS AL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

La evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera se basa en el Principio del Actualismo: es probable que se produzcan movimientos de ladera bajo unas condiciones o situaciones similares a los que ocurrieron en el pasado.

En la literatura científica, la susceptibilidad (*susceptibility*) y peligrosidad (*hazard*) por movimientos de ladera se utilizan a menudo como sinónimos, aunque se refieren a conceptos diferentes. La susceptibilidad se entiende como la probabilidad de ocurrencia de movimientos de ladera en un área determinada, controlada por un conjunto de condiciones (Guzzetti et al., 2005). La peligrosidad describe, además, la magnitud y la componente temporal y, por tanto, tiene en cuenta los factores desencadenantes. Así, los análisis de susceptibilidad y peligrosidad representan una parte importante de la gestión del riesgo (*risk*) por movimientos de ladera (Figura 2).



**Figura 2. Esquema metodológico de la evaluación del riesgo por movimientos de ladera**

Para los análisis de susceptibilidad, el conocimiento de los factores condicionantes es fundamental. Los factores condicionantes son aquellos que describen las características físicas y/o ambientales que influyen en la estabilidad de las laderas. Entre los factores condicionantes más significativos están: el ángulo de inclinación o pendiente de la ladera, la litología, el grado de alteración superficial de los materiales, su contenido en agua, la curvatura y orientación de la ladera, la cobertura vegetal del suelo, etc.

Por otro lado, los factores desencadenantes determinan la distribución temporal de los deslizamientos de ladera. Estos pueden ser inducidos por la acción humana, como la deforestación o actividades mineras, o pueden ser inducidos naturalmente por precipitaciones intensas y/o prolongadas, deshielo rápido, actividad volcánica, terremotos, riadas, etc. (Highland y Bobrowsky, 2008).

## **2.1 Variable dependiente: inventario de movimientos de ladera**

La variable dependiente en el análisis de susceptibilidad define la presencia o ausencia de movimientos de ladera. Para el presente análisis de susceptibilidad, los datos de movimientos del terreno se obtuvieron del inventario nacional y base de datos MOVES del IGME. Para más detalles sobre el inventario de movimientos de ladera, consultar Actividad E2.1.1 (“Informe técnico sobre los inventarios de movimientos de ladera en la provincia de Granada”).

En la provincia de Granada, el inventario cuenta con 736 polígonos de movimientos de ladera (364 deslizamientos, 333 flujos y 39 desprendimientos rocosos), que se han utilizado para el análisis de Razón de Frecuencia (FR). Además, se han utilizado datos puntuales de movimientos de ladera para el análisis de Regresión Logística (LR), ya que no es posible procesar datos de polígonos para este tipo de análisis. Este inventario de los puntuales cuenta con un total de 5.646 movimientos de ladera, 1.038 desprendimientos rocosos, 1.759 deslizamientos y 2.849 flujos. Así, se ha podido realizar una comparación entre ambos métodos, FR y LR.

## 2.2 Variables independientes

Las variables independientes definen los factores condicionantes. Para el presente análisis, se han utilizado los siguientes: el ángulo de la pendiente, la litología y los usos del suelo, ya que se consideran los factores más influyentes en la zona.

### 2.2.1 Pendiente

El ángulo de la pendiente de las laderas se derivó del modelo de elevación digital PNOA del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con un tamaño de pixel de 5x5m. Los valores se clasificaron en 8 intervalos (Figura 3).

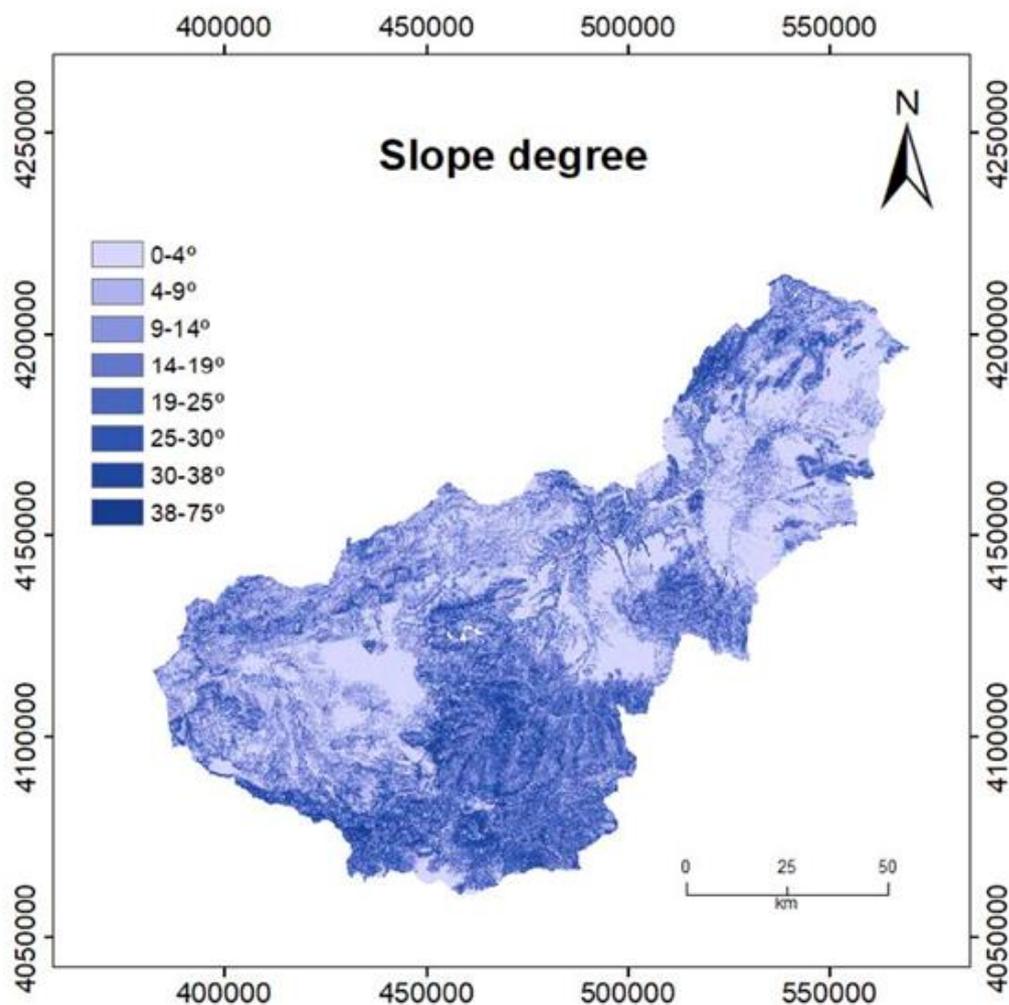


Figura 3. Mapa de pendientes de la Provincia de Granada, con 8 intervalos de pendientes  
 RISKCOAST 2.1.2: Informe técnico sobre susceptibilidad en las zonas de estudio  
 Page 7/23

### 2.2.2 Litología

La información referente a los tipos de litología se obtuvo del mapa geológico continuo de España a escala 1: 50.000, realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Es un parámetro muy importante del que dependen la resistencia y la permeabilidad de los materiales. El mapa geológico de la provincia de Granada consta de más de 200 unidades litológicas diferentes. Para el presente estudio, se llevó a cabo una reclasificación de las unidades en 7 clases, según la dureza de la roca obtenida en base al valor de resistencia a compresión simple del material (Figura 4).

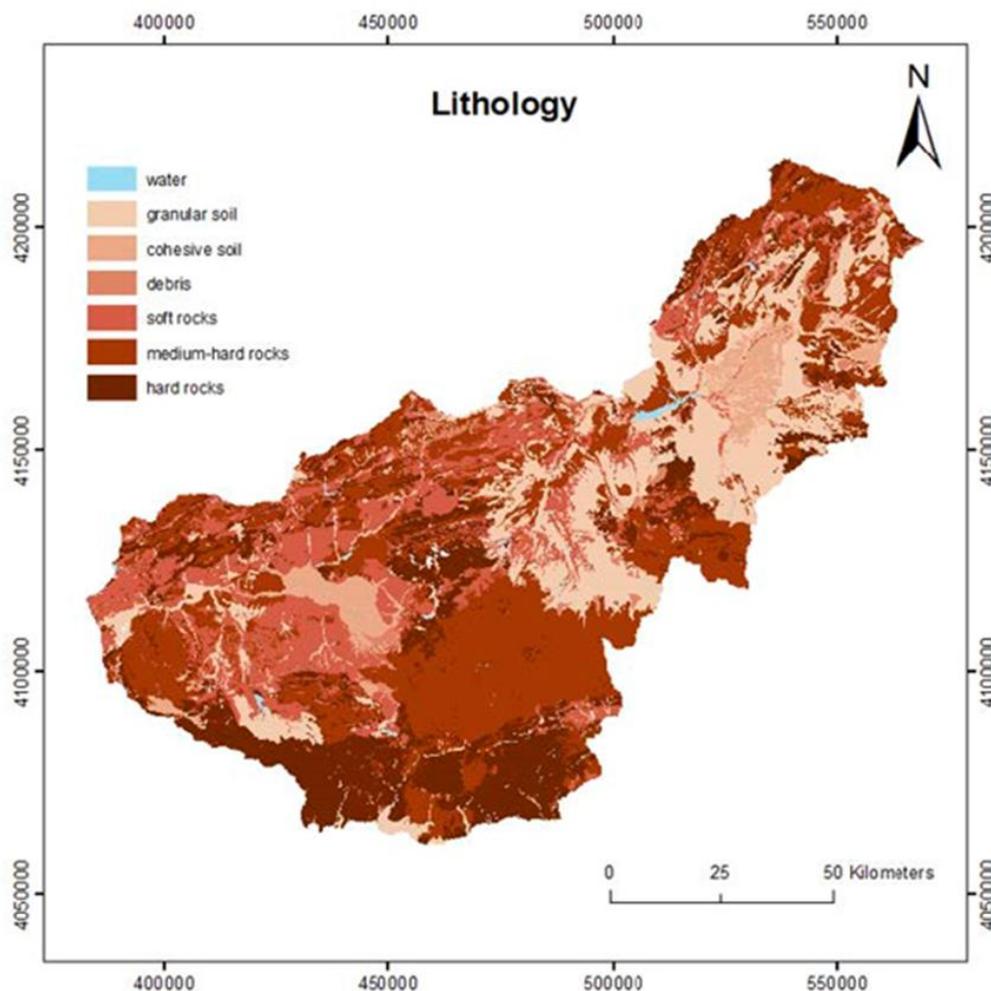


Figura. 4. Mapa litológico de la Provincia de Granada con 7 clases establecidas en base a la dureza (resistencia a compresión simple de los materiales)

### 2.2.3 Uso del suelo

El uso del suelo se considera un factor muy importante ya que las zonas altamente vegetadas, con un buen desarrollo de raíces en el subsuelo, favorecen la estabilidad de las laderas. La información sobre usos del suelo fue obtenida del mapa CORINE realizado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:10.000 en 2012. Para este estudio, las 35 clases existentes en el mapa CORINE se han simplificado en 7 categorías (Figura 5).

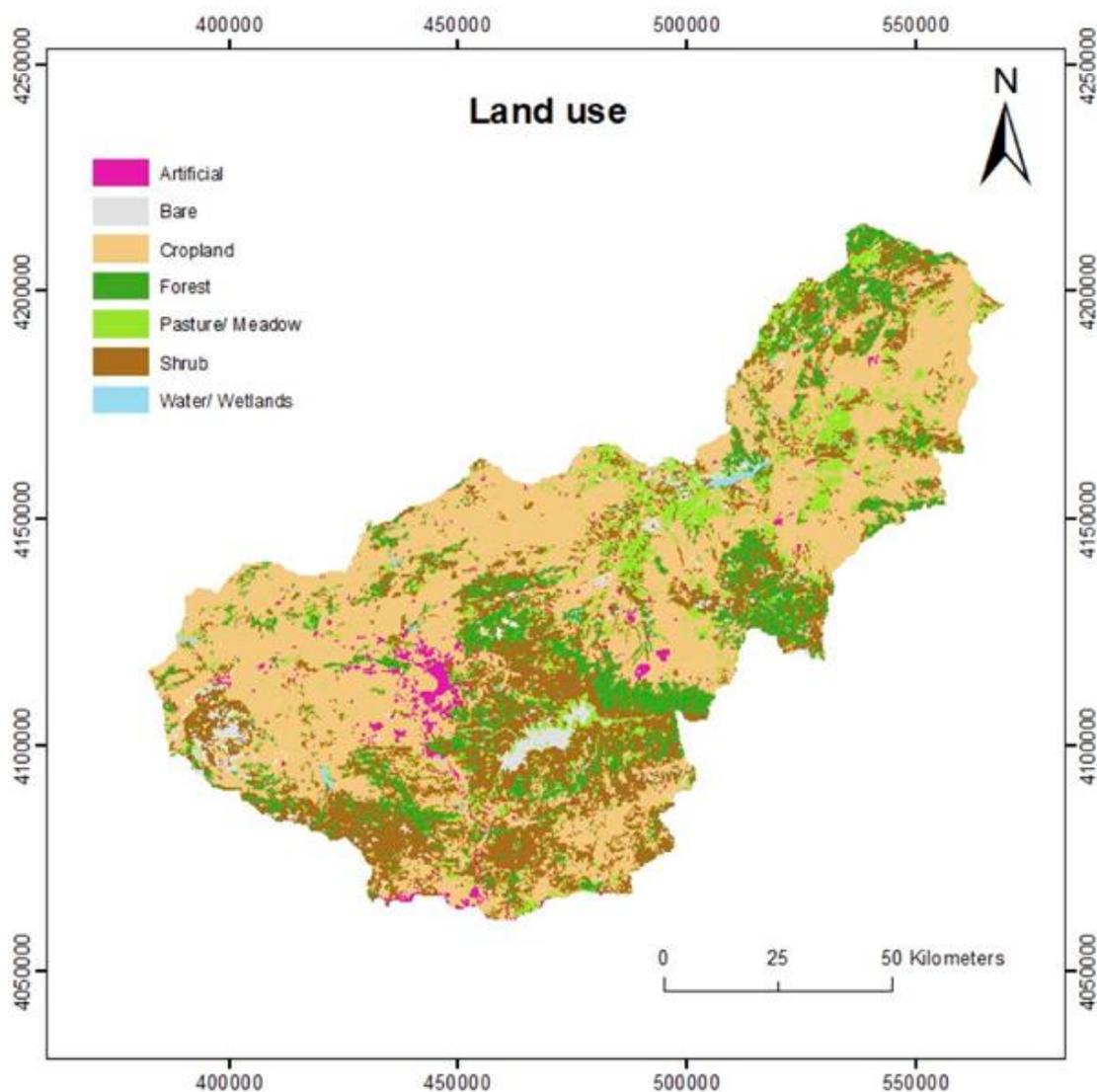


Figura 5. Mapa de usos del suelo de la Provincia de Granada (CORINE)

### 3 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

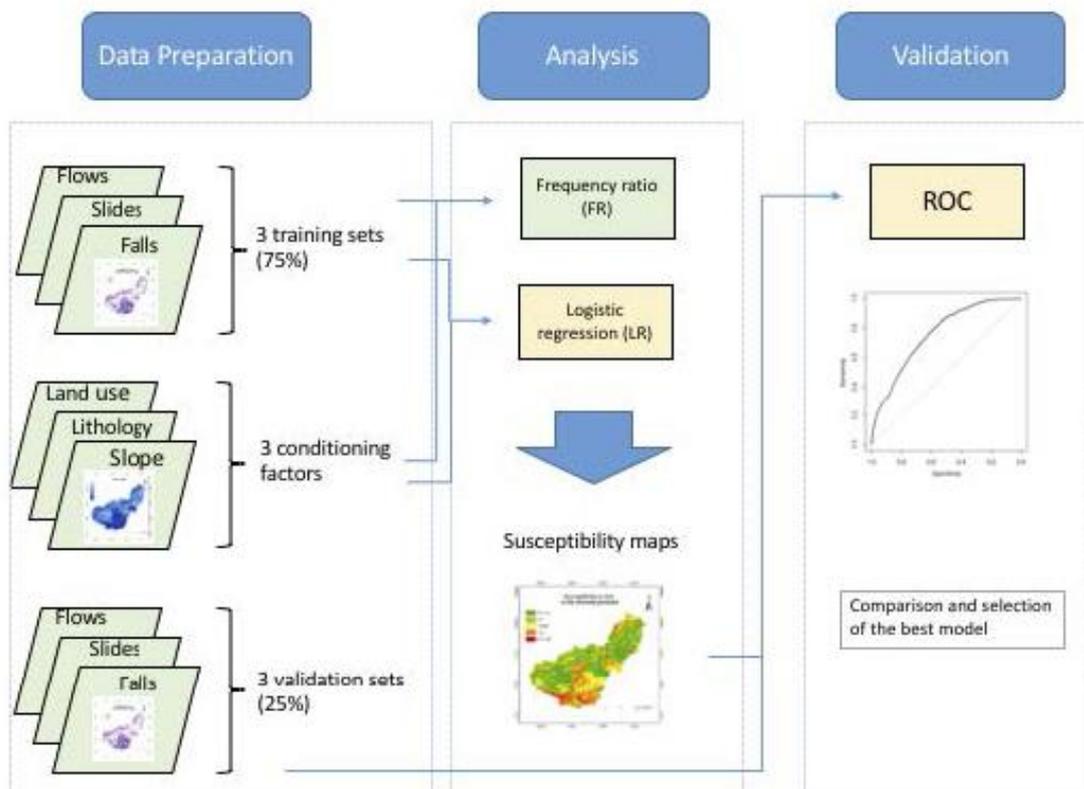
Existen multitud de metodologías para realizar mapas de susceptibilidad, cada una con sus ventajas y limitaciones. Los métodos cualitativos (heurísticos) dependen del conocimiento del experto, que puede establecerse mediante observaciones de campo (Kienholz, 1978) o indirectamente asignando pesos a determinados parámetros en los mapas (Malet et al. 2008; Barredo et al., 2000). Los métodos heurísticos a menudo carecen de un conocimiento suficiente sobre el área de estudio y tienen una alta subjetividad.

En las últimas décadas, con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), han proliferado los métodos cuantitativos para el análisis de susceptibilidad. Estos métodos incluyen métodos deterministas, estadísticos y probabilísticos. Los **métodos deterministas** (Terlien et al., 1995) solo tienen en cuenta los factores condicionantes sin incluir datos históricos de movimientos de ladera, por lo que son bastante útiles para zonas con un escaso registro de movimientos. Estos métodos utilizan modelos físicos, que incluyen análisis de estabilidad de taludes y análisis hidrológicos, para calcular los mecanismos de rotura. Sin embargo, la información requerida (propiedades mecánicas, grado de saturación, etc.) son generalmente difíciles de obtener para zonas amplias, por lo que este método es recomendado únicamente para investigaciones puntuales. Los **métodos estadísticos bivariados** (probabilísticos) y multivariados se utilizan con frecuencia para análisis de susceptibilidad, ya que pueden aplicarse a gran y pequeña escala y son métodos objetivos. Los **métodos probabilísticos** (bivariados), como el de Razón de Frecuencia (Khan et al., 2019, Mezughi, 2011), asignan el peso de cada parámetro según la cantidad de deslizamientos asociados a los factores condicionantes (pendiente, litología y uso del suelo). A diferencia del método bivariado, el método multivariado analiza todas las variables independientes simultáneamente. La presencia o ausencia de movimientos de ladera se analiza mediante una matriz que posteriormente se analiza mediante regresión múltiple o regresión logística (Hemasinghe et al.,

2018; Wang, 2011). Existen otros métodos más recientes para el análisis de susceptibilidad, como las Redes Neuronales Artificiales (ANN) (Ermini et al., 2005; Farrokhzad et al., 2011; Tsangaratos y Benardos, 2014).

En la provincia de Granada se dispone de abundantes datos de movimientos de laderas, por lo que los análisis de susceptibilidad aplicados son el estadístico (Regresión Logística) y probabilístico (Razón de Frecuencia). Los resultados de ambos métodos se comparan posteriormente para evaluar su precisión.

El análisis de susceptibilidad se ha llevado a cabo de la siguiente forma (Figura 6): (1) preparación de datos: incluyendo el mapa de inventario de movimientos de ladera y la determinación de los factores condicionantes, (2) aplicación de modelos de Razón de Frecuencia (FR) y Regresión Logística (LR), y (3) creación del mapa de susceptibilidad de movimientos de ladera (*Landslide Susceptibility Map, LSM*).



**Figura 4. Esquema metodológico del análisis de susceptibilidad a los movimientos de ladera realizado en la provincia de Granada.**

### 3.1 Preparación de datos

Se han utilizado un total de 5646 registros de movimientos de ladera (datos puntuales) y 736 polígonos de la base de datos BD-MOVES para la provincia de Granada. Además, se prepararon mapas para cada factor condicionante, como se describe en el apartado 2.

### 3.2 Modelo de Razón de Frecuencia

La Razón de Frecuencia (FR) es un método probabilístico comúnmente utilizado para el análisis de susceptibilidad de movimientos de ladera basado en las relaciones espaciales observadas entre los factores condicionantes y los eventos (movimientos) ocurridos. Los tres factores condicionantes que se tienen en cuenta son: pendiente, litología y usos del suelo. Los tres parámetros se convirtieron a formato de cuadrícula (*grid*) y se calcularon los valores de FR para cada factor de la siguiente manera:

$$FR = \frac{LS_{ji}/LS}{A_{ji}/A}$$

donde  $LS_{ji} / LS$  define el área de movimientos de ladera en una determinada clase, dividida por el área de todos los movimientos.  $A_{ji} / A$  es el área de la clase dividida por el área total de estudio.

$FR > 1$  indica una correlación más alta, mientras que  $FR < 1$  indica una correlación débil. Se utilizaron valores de FR normalizados (frecuencia relativa) para reclasificar las clases. Finalmente, para calcular el Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI), el FR de las tres clases se resumieron con la calculadora ráster con la siguiente ecuación:

$$LSI = \sum FR_i$$

### 3.3 Modelo de Regresión Logística

El análisis estadístico de susceptibilidad en la provincia de Granada se realizó mediante el software libre LAND-SE (LANDslide Susceptibility Evaluation) desarrollado en lenguaje R. Este software fue desarrollado para realizar modelos de susceptibilidad a escala de cuenca y regional (Rossi y Reichenbach, 2016). La regresión logística es un modelo de análisis multivariado, que utiliza variables independientes para predecir la probabilidad, basándose en un conjunto de variables predictoras. El LR es un análisis multivariado que detecta el mejor ajuste para describir la relación entre la variable dependiente (presencia o ausencia de movimientos de ladera) con el conjunto de variables independientes (pendiente, litología, uso del suelo) y se expresa de la siguiente manera:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

donde P es la probabilidad de ocurrencia de movimientos de ladera y z el valor que define la combinación de los factores independientes, calculados por la siguiente ecuación logística lineal que van de  $-\infty$  a  $+\infty$ , donde  $-\infty < Z < 0$  indican una mayor probabilidad de no ocurrencia de movimientos de ladera y  $0 < Z < +\infty$  implica una mayor probabilidad de ocurrencia.

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

Siendo  $b_0$  la intersección de la función, las variables  $x_{i=1,\dots,n}$  reflejan el potencial factores independientes (causales) y  $b_{i=1,\dots,n}$  definen el peso de cada factor  $x_i$  con el logit z.

La ventaja de este modelo es que las variables de entrada pueden ser continuas (pendiente) o discretas (uso del suelo, litología). Además, en comparación con los modelos de regresión lineal habituales, la regresión logística no requiere de una relación lineal entre variables dependientes e independientes, pero asume una relación lineal entre las variables independientes y el logit z. El modelo

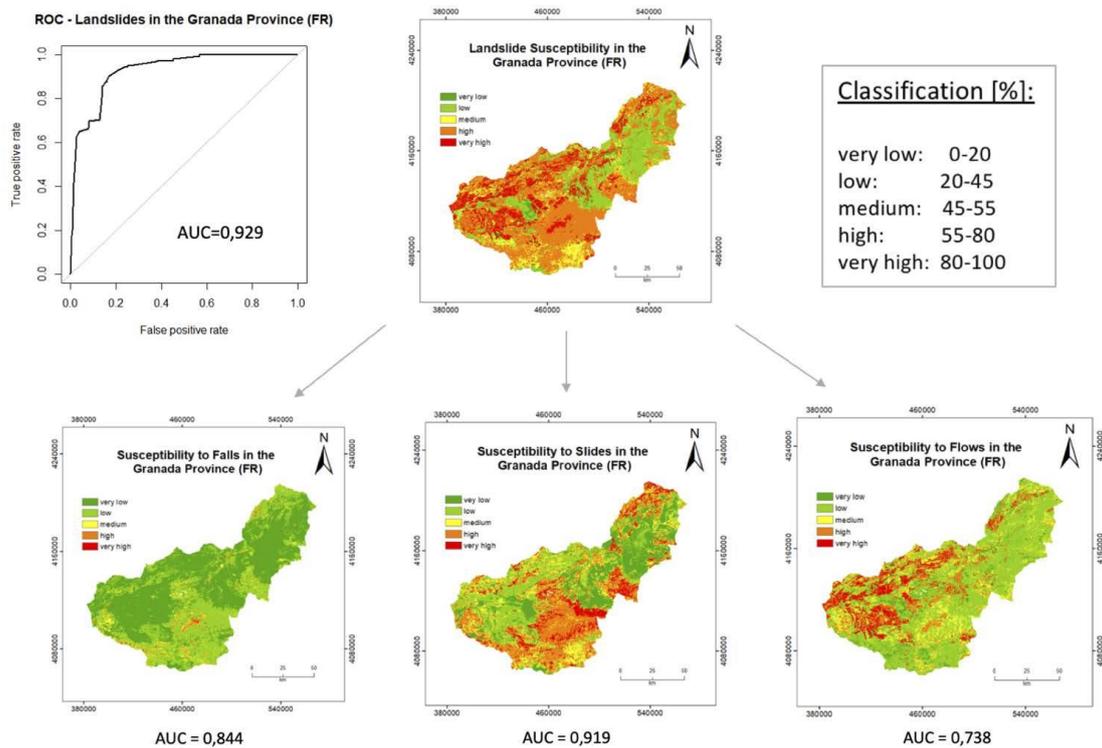
requiere una entrada binaria para la variable dependiente (valores 1 cuando hay un movimiento de ladera o 0 cuando no lo hay).

### 3.4 Validación

La validación del mapa de susceptibilidad es un paso fundamental para determinar su veracidad. Ambos resultados se han evaluado mediante el cálculo de la AUC (Área Bajo la Curva). Este índice se calcula a partir de la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic* o Característica Operativa del Receptor). En el análisis ROC, la proporción de píxeles con una predicción correcta sobre la ocurrencia o no de movimientos de ladera (*True Positive*) se representa frente a los píxeles que se han clasificado de forma errónea (*False Positive*). Se han utilizado parte de los movimientos históricos registrados junto con una cantidad de píxeles seleccionados al azar en áreas en las que no existe registro de movimientos de ladera.

## 4 RESULTADOS: MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS DE LADERA

### 4.1 Método FR, usando datos de polígonos



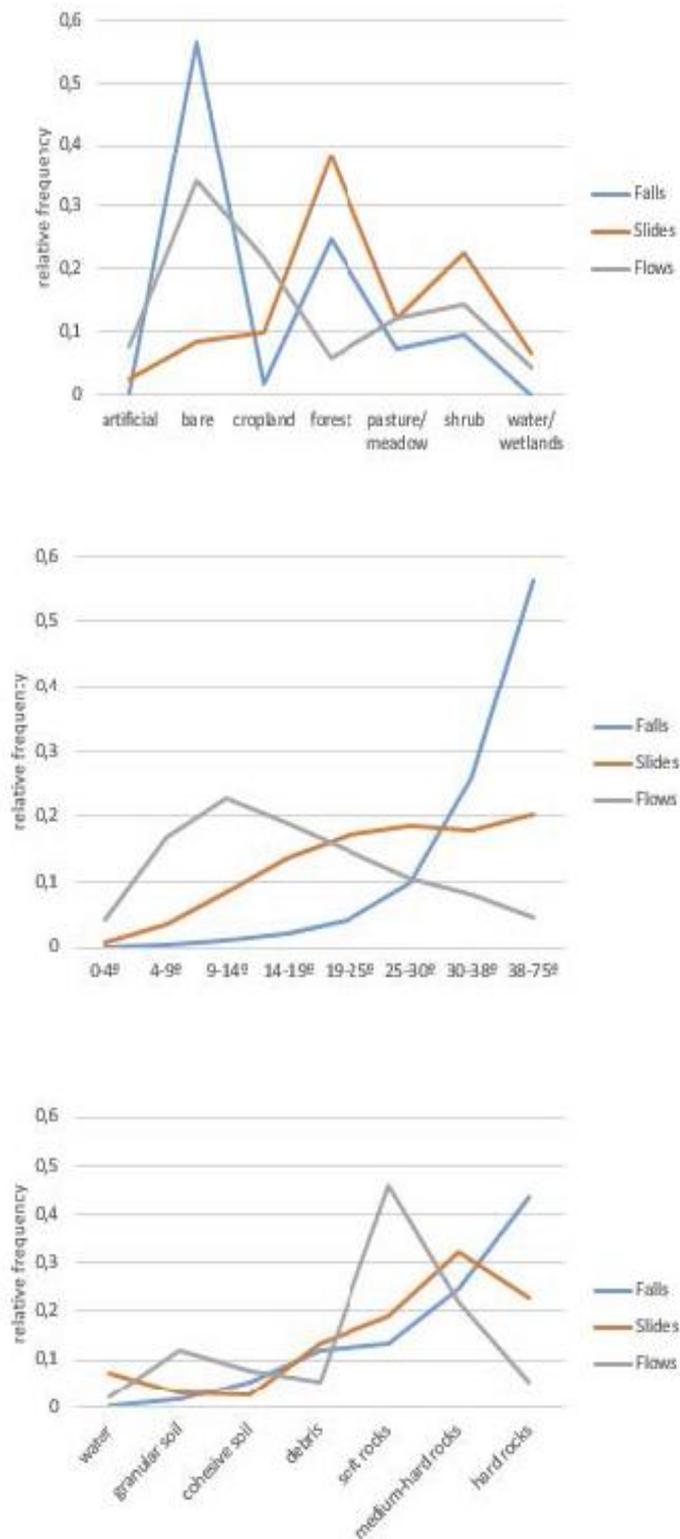
**Figura 5. Mapas de susceptibilidad de movimientos de ladera obtenidos del análisis FR usando el inventario de datos poligonales.**

La Figura 5 muestra el mapa de susceptibilidad de movimientos de ladera obtenido mediante el método de Razón de Frecuencia (FR), mediante el uso de los datos de polígonos de movimientos de ladera del inventario recopilado en BD-MOVES. Además, se muestran tres mapas de susceptibilidad para cada tipología de movimientos: desprendimientos de roca (*rockfalls*), deslizamientos (*slides*) y flujos (*flows*). De forma general, se puede afirmar que la totalidad de la provincia es muy susceptible a movimientos de ladera, como cabría esperar en

una región tan montañosa. Según el tipo de movimiento de ladera, podemos hacer las siguientes apreciaciones:

- El mayor grado de susceptibilidad a los desprendimientos se ubica en las cumbres más altas de Sierra Nevada, donde los procesos de gelifracción son continuos.
- La elevada susceptibilidad a los deslizamientos se distribuye en el conjunto de Sierra Nevada, y su orla metamórfica, al noreste y sur de la provincia, incluyendo la Costa Tropical granadina.
- La mayor susceptibilidad a los flujos se localiza en las zonas central y oeste-noroeste de la provincia de Granada, donde predominan los afloramientos de naturaleza limo-arcillosa.

La Figura 6 muestra tres gráficos que ilustran los resultados del método de Razón de Frecuencia (FR), según tres los factores condicionantes principales de la zona: pendiente, litología y uso de suelo. Se observa que existe una mayor probabilidad de generación de desprendimientos en pendientes mayores de 28°, mientras que los flujos ocurren con mayor frecuencia en pendientes menos pronunciadas, entre 9-14°. Con respecto a la litología, los desprendimientos son más frecuentes conforme aumenta la dureza de la roca, los flujos son los más frecuentes en rocas blandas y los deslizamientos se generan en rocas de dureza media. Las áreas más susceptibles a los deslizamientos se corresponden con aquellas rocas de dureza media-alta, que afloran en el contorno de Sierra Nevada y el sur de la provincia, mientras que las áreas susceptibles a los flujos se localizan al noroeste de la provincia, donde afloran predominantemente materiales de naturaleza limo-arcillosa (litologías más blandas). Por último, cabe destacar que los desprendimientos y flujos muestran una mayor probabilidad de ocurrencia en las zonas de roca desnuda o escasa vegetación mientras que los deslizamientos son más propensos a ocurrir en zonas de arbustos y bosques.



**Figura 6. Distribución de cada tipo de movimiento de ladera según el análisis FR para los factores condicionantes de uso de suelo, pendiente y litología.**

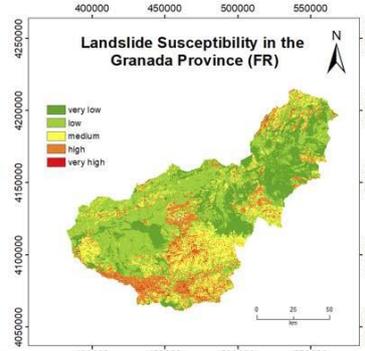
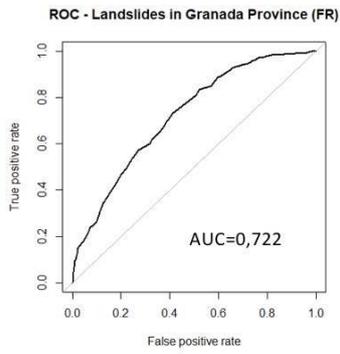
En cuanto a las validaciones de mapas, se han obtenido resultados satisfactorios para el mapa de susceptibilidad de movimientos de ladera (completo), con una precisión del 92,9%. Distinguiendo según el tipo de movimiento de ladera, los mejores resultados se obtuvieron para deslizamientos (AUC = 0.919), seguido de desprendimientos con un AUC de 0,844 y flujos (AUC = 0,738).

Analizando el mapa de susceptibilidad completo, se obtiene que el 61,33% de la provincia es altamente susceptible a los movimientos de ladera. Una distinción entre los diferentes tipos de movimientos indica que los deslizamientos representan la mayor susceptibilidad en la provincia de Granada, con un 36,93%, seguida de los flujos (23,54%) y de desprendimientos, con solo 2.31% del área total.

#### **4.2 Método FR y método LR usando datos puntuales**

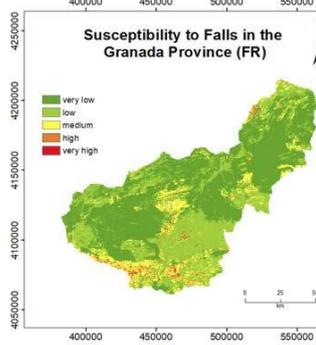
Las Figuras 8 y 9 muestran los mapas de susceptibilidad de movimientos de ladera obtenido mediante los métodos de Razón de Frecuencia (FR) y Regresión Logística (LR), respectivamente, los cuales se usaron los datos de puntos del inventario de movimientos de ladera recopilado en BD-MOVES. Además, se muestran tres mapas para cada una de las tipologías de movimientos de ladera: desprendimientos de roca (*rockfalls*), deslizamientos (*slides*) y flujos (*flow*).

## Frequency Ratio Model

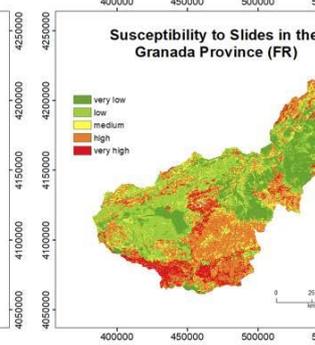


### Classification [%]:

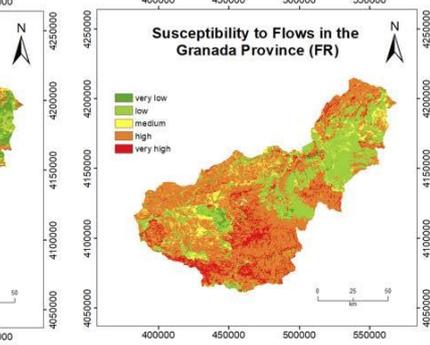
very low: 0-20  
 low: 20-45  
 medium: 45-55  
 high: 55-80  
 very high: 80-100



AUC=0,887



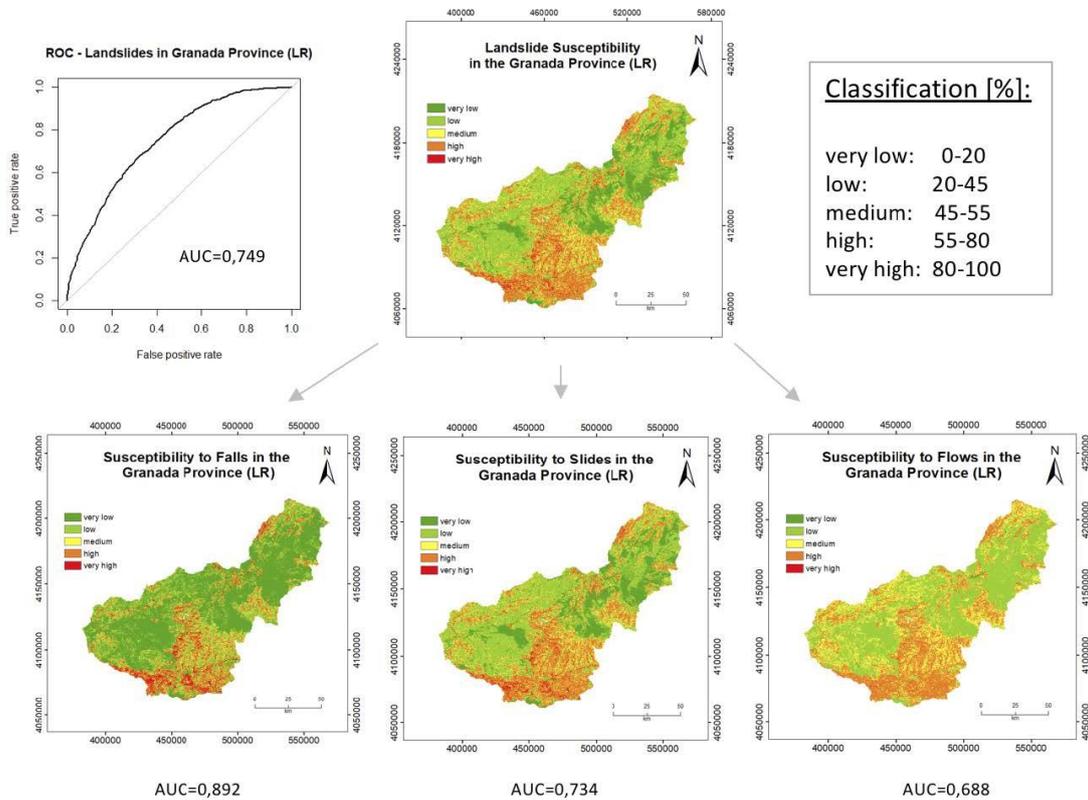
AUC=0,716



AUC=0,675

**Figura 8. Mapas de susceptibilidad de movimientos de ladera obtenidos del análisis FR usando el inventario de datos puntuales.**

## Logistic Regression Model



**Figura 9. Mapas de susceptibilidad de movimientos de ladera obtenidos del análisis LR usando el inventario de datos puntuales.**

Los resultados son aceptables para todos los tipos de movimientos de ladera, con valores de AUC comprendidos entre 0,675 y 0,887. Sin embargo, los resultados de la validación son mucho más imprecisos en comparación con los obtenidos del análisis FR con datos de polígonos, a excepción del resultado para desprendimientos, donde el rendimiento predictivo mejora en un 4,3%. Esto podría explicarse por la diferencia en el registro de los inventarios: para los desprendimientos, el mapa de susceptibilidad es más preciso porque contiene los datos puntuales de 1.038 eventos. Además, se puede observar que, utilizando datos puntuales, el mapa de susceptibilidad para flujos es el más impreciso (AUC = 0,675). Esto podría deberse a que los desprendimientos se

pueden cartografiar con mayor precisión en el campo mientras que los flujos son más difíciles de identificar y delimitar.

Resulta evidente que los mapas obtenidos con el método FR sobrestiman las áreas susceptibles para deslizamientos y flujos mientras que subestiman las áreas susceptibles a desprendimientos. Por ello, para RISKCOAST, **se selecciona el mapa de susceptibilidad para datos puntuales elaborado con el método LR** (Figura 9). Sin embargo, el método LR presenta limitaciones para trabajar con datos poligonales y no es posible generar un mapa de susceptibilidad para este tipo de datos. Por tanto, para RISKCOAST, **se selecciona el mapa de susceptibilidad para datos poligonales elaborado con el método FR** (Figura 5). Ambos mapas se presentan como anexos al presente informe técnico para su mejor visualización.

## 5 CONCLUSIONES

- La provincia de Granada, al ser muy montañosa, es muy susceptible a los movimientos de ladera. El 48% de la provincia presenta media/alta susceptibilidad a este tipo de procesos, siendo los deslizamientos los más propensos a ocurrir, con un 36,93% de territorio susceptible a estas tipologías.
- La mayor susceptibilidad a los desprendimientos se localiza en las zonas más elevadas de Sierra Nevada, donde existen rocas muy duras (esquistos y mármoles) y pendientes elevadas, así como procesos de gelifracción que fracturan el macizo rocoso
- La mayor susceptibilidad a los deslizamientos se produce en los alrededores de Sierra Nevada, en la franja de los materiales del Alpujárride, con importantes afloramientos de filitas, así como en los contactos con las cuencas intramontañosas (Granada, Padul, Guadix, Baza) del Neógeno. También en la franja costera de la provincia, con extensos afloramientos de filitas.

- La mayor susceptibilidad a los flujos se concentra en el noroeste de la provincia de Granada, en las denominadas Zonas Externas de la Cordillera Bética, donde afloran rocas blandas de naturaleza arcilloso-limosa.
- La franja costera, y zona de trabajo RISKCOAST, es muy susceptible en su conjunto a las diferentes tipologías de movimientos de ladera. Tanto por las elevadas pendientes que presenta (en la vertiente sur de Sierra Nevada) como por la variedad de materiales susceptibles.

## 6 REFERENCIAS

- Barredo, J., Benavides, A., Hervás, J., and van Westen, C. J., 2000. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2 (1), 9–23.
- Ermini, L., Catani, F., and Casagli, N., 2005. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66 (1), 327–343.
- Farrokhzad, F., Barari, A., Choobbasti, A. J., and Ibsen, L. B., 2011. Neural network-based model for landslide susceptibility and soil longitudinal profile analyses: Two case studies. *Journal of African Earth Sciences*, 61 (5), 349–357.
- Hemasinghe, H., Rangali, R. S. S., Deshapriya, N. L., and Samarakoon, L., 2018. Landslide susceptibility mapping using logistic regression model (a case study in Badulla District, Sri Lanka). *Procedia Engineering*, 212, 1046–1053.
- Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., and Calligaris, C., 2019. Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22 (1), 11–24

- Kienholz, H., 1978. Maps of Geomorphology and Natural Hazards of Grindelwald, Switzerland: Scale 1:10,000. *Arctic and Alpine Research*, 10 (2), 169–184.
- Malet, J.-P., Thiery, Y., Hervás, J., Günther, A., Puissant, A., and Grandjean, G., 2008. Landslide susceptibility mapping at 1:1 M scale over France: exploratory results with a heuristic model. Presented at the First French Conference on Landslides, At Orléans.
- Mezughi, 2011. Landslide Susceptibility Assessment using Frequency Ratio Model Applied to an Area along the E-W Highway (Gerik-Jeli). *American Journal of Environmental Sciences*, 7 (1), 43–50
- Rossi, M. and Reichenbach, P., 2016. LAND-SE: a software for statistically based Landslide susceptibility zonation, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, 9 (10), 3533–3543.
- Terlien, M. T. J., Westen, C. J. van, and Asch, T. W. J. van, 1995. Deterministic modelling in GIS – based landslide hazard assessment. *Geographical information systems in assessing natural hazards: selected contributions from the international workshop held in Perugia on September 20-22 1993 (Advances in natural and technological hazards research; 5)*, 57–77
- Tsangaratos, P. and Benardos, A., 2014. Estimating landslide susceptibility through an artificial neural network classifier. *Natural Hazards*, 74 (3), 1489–1516.
- Wang, L., 2011. Landslide Susceptibility Mapping by Using Logistic Regression Model with Neighborhood Analysis: A Case Study in Mizunami City. *International Journal of Geomate*.