

## ESTRATEGIAS DE TRANSFERENCIA ESPACIAL PARA LA EVALUACIÓN DE PELIGROSIDAD MÚLTIPLE EN EL ENTORNO DE INFRAESTRUCTURAS VIARIAS

Sergio Reyes-Corredera<sup>1</sup>, María J. Perles-Roselló<sup>1</sup> y Juan F. Sortino-Barrionuevo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía (Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Málaga, Bulevar Louis Pasteur, 29071. Málaga, España) [sergioreyes@uma.es](mailto:sergioreyes@uma.es), [mjperles@uma.es](mailto:mjperles@uma.es), [francis.sortino@gmail.com](mailto:francis.sortino@gmail.com)

### RESUMEN

En las últimas décadas se ha apreciado un mayor grado de afectación de las infraestructuras de comunicación debido a la complejidad de la obra pública para solventar tramos de viales que transcurren por entornos complejos. En esta comunicación se ha generado un procedimiento de trabajo en el que el empleo de algoritmos ad-hoc, basados en aprovechamiento y desarrollo de scripts de Python GRASS, para el cálculo de la transferencia de energía y materia por las diversas casuísticas de peligro natural a las que se ven sometidas las infraestructuras viarias andaluzas ante episodios de activación de riesgos de un modo simultáneo en periodos de lluvias torrenciales. Se expondrán dos ejemplos de dichos algoritmos aplicados a las laderas inmediatas a una carretera en la que se aprecian fenómenos de peligrosidad.

**Palabras clave:** transferencia espacial; multi riesgo; movimientos gravitacionales; peligrosidad

### ABSTRACT

In recent decades it has appreciated a greater degree of involvement of the infrastructure of communication due to the complexity of public work to solve stretches of roads that pass through complex environments, In this communication it has generated a work process what apply ad-hoc algorithms, based in Python GRASS scripts to calculate energy and matter transfer by different natural danger cases what affects to these road infrastructures in Andalusia in torrential rain periods. It shows two examples of these algorithms applied to the immediate to a road slopes where is appreciated hazard phenomena.

**Keywords:** spatial transference; multi risk; gravitational moving; hazard

### 1. INTRODUCCIÓN

En el marco del Proyecto de Investigación (G-GI3002/IDIS) "Elaboración de una metodología aplicada para la detección de puntos conflictivos en las infraestructuras viarias de áreas periurbanas andaluzas ante episodios de activación de riesgos sinérgicos asociados a lluvias torrenciales" (8.06/5.26.4120) financiado por Fondos FEDER por la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía se ha comprobado el papel de las infraestructuras viarias como elementos artificiales del territorio de carácter lineal que a lo largo de su trazado interactúan de forma estrecha con los procesos geomorfológicos de su entorno, produciéndose disfunciones e interacciones de distinto tipo, que en muchos casos se transforman en peligros. Los procesos que generalmente producen una afectación más directa sobre las carreteras se relacionan con las dinámicas gravitatorias (movimientos del terreno) e hídricas, que pueden causar una invasión de la calzada por agua u otros materiales. La propia excavación de taludes y desmontes para la construcción de la carretera actúa como factor activador de deslizamientos y desprendimientos (Corominas, 2013). Son igualmente frecuentes los procesos de subsidencia del firme en las laderas subyacentes a la calzada, que pueden vincularse a terraplenes insuficientemente consolidados, sometidos a procesos cíclicos de inundación, o afectados por cursos hídricos que humedecen y/o erosionan la base de la ladera produciendo su inestabilización. En ocasiones, los problemas se vinculan a la invasión de agua en la carretera, que puede generar balsas y otras formas de inundación, bien por mal funcionamiento de los sistema de drenaje transversal (generalmente un "culvert") (Flanagan et al., 1998), o bien por desbordamiento de cursos de agua que intersectan la carretera. Además, los cambios introducidos en la permeabilidad del entorno alteran los procesos erosión-depósito, y la dinámica del flujo hídrico en las inmediaciones de la carretera (Prasad, 2007).

La función estratégica de estas infraestructuras en normal discurrir de los flujos poblacionales y de mercancías en el territorio otorga una singular importancia a la interrupción de su normal funcionamiento. Por esta razón, la identificación de los puntos del trazado con mayor probabilidad de ser afectados por fenómenos que produzcan bloqueos u otro tipo de afectación permite dar prioridad a las labores preventivas más urgentes en cada carretera, y contribuir así de forma directa a la mejora de las condiciones de seguridad y disminución de costes post-evento.

En este proyecto se ha desarrollado una serie de algoritmos y procedimientos integrados en una interfaz informática que, a partir de una información cartográfica de entrada, aplica una serie de ecuaciones predictivas que permiten identificar y situar en el espacio los puntos de la carretera que tienen mayor probabilidad de recibir el impacto de algunos de los procesos peligrosos identificados. De este modo se ha desarrollado una herramienta predictiva que puede aplicarse a la gestión del riesgo en infraestructuras ya construida o como instrumento de simulación en la fase de proyecto y selección de alternativas del trazado. Este tipo de propuestas metodológicas y herramientas de apoyo de marcada utilidad aplicada adquieren especial interés y actualidad ante la promulgación reciente de documentos normativos que instan a la elaboración de cartografías de riesgos específicas para los entornos especialmente sensibles de las denominadas Infraestructuras Críticas.

Los procesos de peligrosidad tratados poseen un comportamiento particular en lo que se refiere a su dinámica espacial, lo que ha requerido el diseño y programación de algunos procedimientos de análisis espacial complejos cuya reproducción puede ser de interés en casos similares o afines. Por ello se ha desarrollado una metodología de trabajo basada en procedimientos y algoritmos que solventen estas carencias en el análisis de estas casuísticas específicas.

El objetivo de la presente comunicación es, mediante el análisis y descripción de un caso de análisis, mostrar a través de un ejemplo las características de las estrategias espaciales complejas que ha sido necesario implementar en la interfaz informática para poder evaluar procesos de peligrosidad asociados a una infraestructura lineal que manifiestan una marcada transferencia espacial entre las áreas causantes del procesos de peligrosidad, y las áreas receptoras de los efectos del proceso.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

Los tramos utilizados en el trabajo se sitúan en una zona en el entorno de la ronda de circunvalación Este de la ciudad de Málaga (España) (Autovía A-7 de la Red General de Carreteras del Estado). El entorno por el que discurre este vial se caracteriza por ser una zona de características suburbanas y periurbanas con una alta movilidad de tráfico rodado con valores de intensidad media diaria superiores a los 75.000 vehículos al día (Ministerio de Fomento, 2014) y constituyéndose como un área muy vulnerable socioeconómicamente (Figura 1).

En este sector de carretera se han producido, desde su construcción en el año 1992, frecuentes episodios de movilización en taludes y laderas con importantes consecuencias sobre el funcionamiento del tráfico y elevados costes en labores de restauración

Se trata de un área con pendientes muy elevadas, y desde el punto de vista geológico tiene una complejidad estructural y tectónica que dan variabilidad a la zona, con yuxtaposición y superposición de series de características muy variadas (materiales esquistosos paleozoicos, serie permo-triásica de conglomerados, yesos y arcillas y calizas y dolomías jurásicas, fundamentalmente). Estos materiales presentan un elevado contraste tanto en permeabilidad como en comportamiento mecánico de la roca, lo que aumenta la posible casuística de susceptibilidad a los movimientos gravitacionales.

El carácter periurbano de la infraestructura acrecienta las posibilidades de intervenciones antrópicas en el entorno, y con ello la existencia de factores activadores de los movimientos de ladera que generan peligrosidad. Todas estas características han determinado la selección del área de estudio como caso para la obtención de los datos empíricos en los que se sustenta el modelo predictivo. La variedad de casuísticas

potenciales han permitido experimentar con distintas estrategias de análisis espacial para la obtención de resultados.



**Figura 1.** Tramo analizado en la Ronda de Circunvalación de Málaga (Autovías MA-20 y A-7). Fuente: Elaboración propia.

### 3. ANTECEDENTES Y BASES CONCEPTUALES DE LA METODOLOGÍA

El fundamento conceptual en el que se basa la metodología es la idea de funcionamiento en cadena de los peligros asociados que concurren en un espacio (Perles Roselló, 2010; Perles Roselló y Mérida Rodríguez, 2010; Perles Roselló y Cantarero Prados, 2010). Según este enfoque, el espacio y sus relaciones topológicas actúa como vector que unifica e interrelaciona procesos de riesgo de origen diverso que pueden funcionar de forma enlazada cuando las condiciones espacio-temporales de transmisión de materia y energía así lo permitan.

Desde este punto de vista, para analizar con efectividad los espacios afectados por riesgos múltiples, como puede ser el caso de las infraestructuras viarias, es necesario establecer inicialmente un patrón espacial de flujos y comportamientos en cadena, identificando las áreas causantes de la peligrosidad, las vías de transmisión de proceso de peligrosidad, y, por último, las áreas receptoras del impacto. En la definición de este patrón de transmisión de materia y energía es necesario respetar la secuencia topológica que guía los procesos, y la transferencia espacial que se produce entre las zonas causantes y las receptoras. El procedimiento de integración de los peligros, como se explica más adelante, no se ha fundamentado en la presencia de un agente causante común, sino en la vinculación de los peligros a través de un vector común de transferencia de masa y energía (como por ejemplo la dinámica gravitacional y la de fluidos). El documento cartográfico resultante del trabajo debe reflejar la seriación topológica de acciones implicadas en los distintos peligros, los procesos de retroalimentación y sinergia consecuente y la transferencia espacial y temporal entre las causas y las consecuencias.

El área causal de cada tipo de peligro abarca todo el espacio continuo en el cual existe la posibilidad de que una acción determinada tenga consecuencias en otro punto de esa misma área. Este área se define en función del vector de transferencia de masa y energía que actúe en ese tipo de peligro como transmisor de

consecuencias; en la aplicación que nos ocupa se delimita por tanto en razón de la dinámica gravitatoria, de fluidos, y/o atmosférica.

Las metodologías para la cartografía multi-peligros y multi-riesgo han desarrollado en muy escasa medida la cuestión de la acumulación de los peligros en cadena. Como indican Delmonaco, Margottini y Spizzichino (2006), el enfoque se enfrenta a problemas intrínsecos como son la dificultad para predecir exactamente los umbrales críticos que pueden producir cambios en el comportamiento de los procesos de peligro, la intensidad de los efectos dominó y el carácter no lineal de los fenómenos complejos. Las aplicaciones concretas en esta línea de trabajo se centran en experiencias de monitorización de la transferencia de masa y energía a partir de experimentos empíricos a escala muy detallada (Burton y Bathurst, 1998; Pedraza et al., 2004; Bodoque et al., 2005), fundamentalmente conectando los peligros de erosión, incendio, movimientos en masa e inundación. Los trabajos de evaluación de peligros en cadena a una escala útil para su aplicación en la prevención del sigue siendo una asignatura pendiente y las propuestas se plantean a nivel de tentativas. Pueden considerarse trabajos antecedentes los diseñado en la Universidad de Colorado; el Integrated Planning Decision Support System (IPDSS), tiene en cuenta efectos dominó y peligros secundarios, para fenómenos relacionados con la estabilidad de laderas. Trabajos como los de Lari et al. (2008) que se fundamentan en análisis probabilísticos, con escaso desarrollo de los procesos de transferencia espacial. La aportación que desarrolla el concepto de transferencia espacial a una escala más afín a la utilizada en la comunicación es la presentada por la Agencia de Gestión de Desastres de Tayikistán recogido en Kumpulainen (2006). La metodología aplicada, aunque de forma elemental aborda, la cuestión de la diferente tendencia expansiva de la peligrosidad en cada tipo de peligro. Distingue en cada mapa el área fuente o causal, la ruta de expansión y la zona de impacto. Diferencia igualmente entre patrones de expansión del peligro de tendencia radial y direccional.

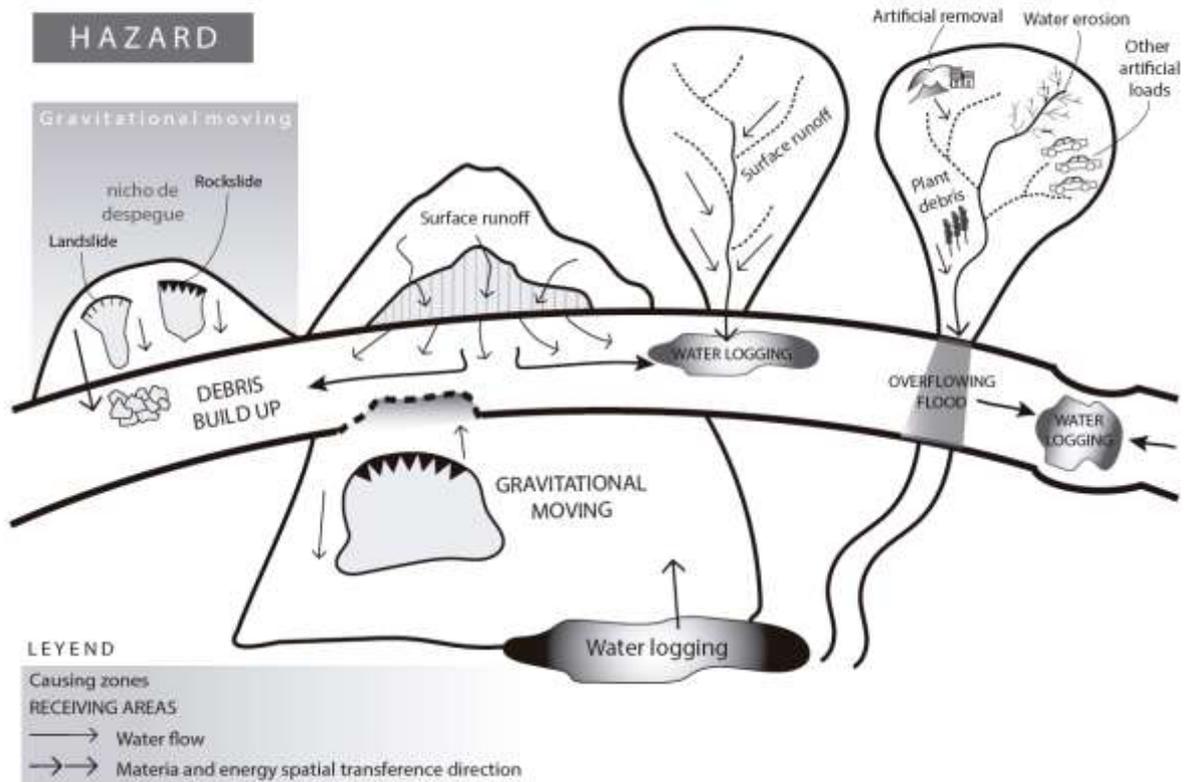
#### 4. FASES METODOLÓGICAS APLICADAS

##### 4.1.1 *Identificación de procesos geomorfológicos de peligrosidad que afectan a la infraestructura viaria y de sus dinámicas espaciales*

Los principales problemas que pueden producir pérdidas de funcionalidad del tráfico viario se relacionan con procesos geomorfológicos gravitacionales, que pueden producir la irrupción de materiales desplazados desde las laderas adyacentes a la infraestructura o subsidencia del firme si la ladera movilizada es subyacente. Otros procesos de peligrosidad que interrumpen el normal funcionamiento de la infraestructura se relacionan con la presencia de agua en la calzada, tanto en forma de balsas y encharcamientos como de irrupción del caudal de un cauce en la calzada por desbordamiento.

Los procesos de peligrosidad identificados responden en su comportamiento de transferencia de materia y energía a dinámicas gravitacionales y de fluidos; estas dinámicas definen las trayectorias espaciales previsibles, y en ellas se fundamenta la definición de unidades espaciales definidas en el trabajo. En razón de la dinámica de cada proceso de peligrosidad, se han identificados las unidades espaciales necesarias para individualizar áreas causantes y receptoras para cada problema de peligrosidad en concreto.

Los procesos de peligrosidad que se producen en el entorno de las infraestructuras viarias identificados en el trabajo son los siguientes (ver figura 2):



**Figura 2.** Procesos de peligrosidad que se producen en el entorno de las infraestructuras viarias identificados. Fuente: Elaboración propia.

Procesos relacionados con movimientos en masa:

- Caída de materiales por procesos de deslizamiento o desprendimiento desde las laderas adyacentes a la carretera, y depósito de los mismos en la berma constituida por la propia calzada y el arcén paralelo. Las zonas receptoras del material y del impacto son por tanto doble (arcén o firme de la calzada). La probabilidad de afección del tráfico por bloqueo dependerá del alcance de la masa movilizada según su inercia, y también del tamaño del arcén, que puede llegar a contener en sí mismo los depósitos de la movilización.
- Movilización en masa por deslizamiento o desprendimiento de los materiales de la ladera subyacente y sustentante de la infraestructura viaria. Los factores causantes de la movilización pueden situarse y actuar desde una doble posición. Por una parte, la activación del movimiento depende de la concurrencia de factores predisponentes en la propia ladera; de otro lado la estabilidad de la ladera puede verse afectada por procesos de inestabilización en su sector basal, esencialmente humidificación o zapado. La humidificación, si la litología componente de la ladera lo facilita, genera aumento de peso, volumen y falta de consistencia en los materiales, con la consiguiente pérdida de estabilidad. La humidificación basal de la ladera se relaciona con la presencia de zonas con un aporte extra de humedad en contacto con la parte baja de la misma, normalmente asociada a áreas endorreicas (zonas de mal drenaje y embalsamiento). Por su parte, los zapados en la base de la ladera sustentante pueden responder a acciones artificiales, aunque de forma natural se relacionan con la actividad erosiva de cursos de agua que discurren aledaños a su límite inferior. El zapado puede producir inestabilización por falta de sustentación y en ocasiones genera desplomes.

Las consecuencias de la movilización de las laderas subyacentes a la calzada se perciben tanto en el área receptora de los materiales movilizados (base de la ladera), como en la propia infraestructura viaria, donde se

produce un descalzamiento que puede generar subsidencias y rotura del firme, con el consiguiente bloqueo de la funcionalidad de la carretera

#### *4.1.2 Definición de las unidades espaciales básicas y de los principales procesos de transferencia espacial entre ellas.*

Para la simulación de los problemas de peligrosidad que pueden afectar a la infraestructura se han identificado y delimitado una serie de unidades espaciales funcionales causantes y otras receptoras de los impactos, lo que permite contemplar las trayectorias espaciales que regulan los procesos. Las principales unidades espaciales definidas son las siguientes:

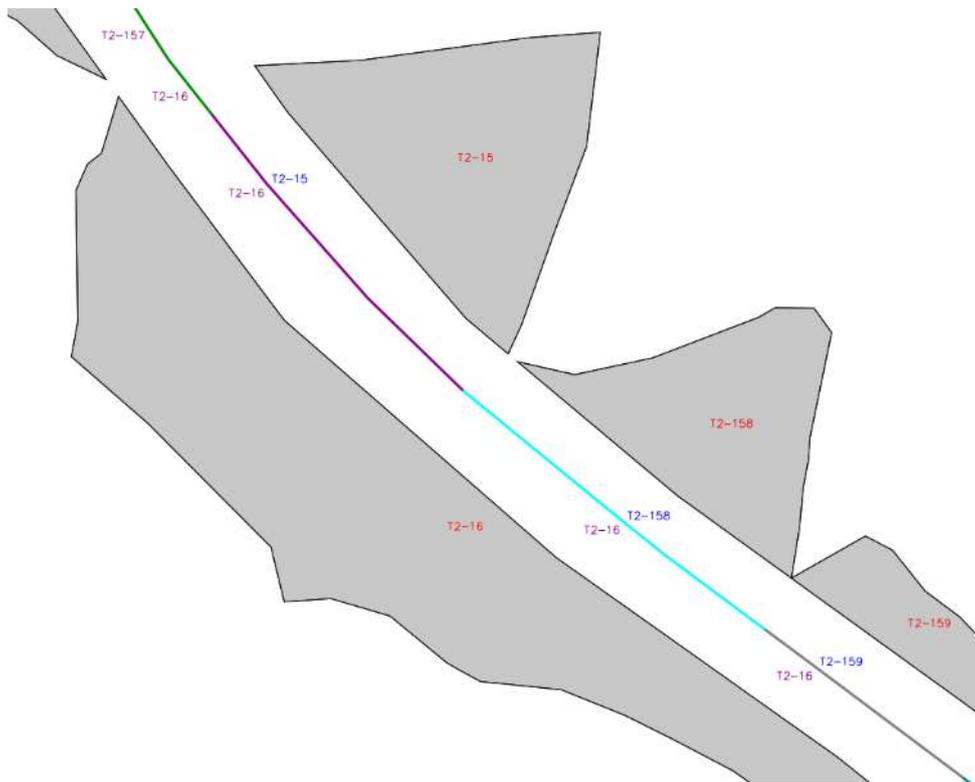
- Laderas adyacentes a la infraestructura viarias, individualizando las laderas situadas en una posición relativa superior a la carretera (laderas suprayacentes) y las ubicadas en una posición inferior a la misma (laderas subyacentes).
- Tramos de la carretera adyacentes a cada ladera, y que actúan como receptores de los procesos causados en la misma (recepción de movimientos en masa y de escorrentía). Se ha individualizado como tramos diferenciados los viales de diferente sentido de circulación en la carretera.
- Áreas correspondientes al arcén y a la calzada de la infraestructura viaria.
- Tramos del perfil longitudinal de la carretera en razón de su morfología de tendencia cóncava o convexa.
- Áreas endorreicas situadas en la base de las laderas subyacentes, con propensión a la acumulación y estancamiento del flujo hídrico.
- Cuencas hidrográficas que intersectan la infraestructura y vierten en la misma.
- Cuencas hidrográficas que intersectan o contactan lateralmente con la infraestructura situadas en un nivel topográfico inferior a la misma.

#### *4.1.3 Procedimientos aplicados para la identificación de unidades espaciales y de los principales procesos de transferencia espacial entre áreas causantes y unidades espaciales receptoras.*

Atendiendo a los procesos geomorfológicos de peligrosidad que afectan a la infraestructura viaria se han elaborado una serie de algoritmos basados en scripts programados en grass.py (GRASS Development Team, 2016) y que son generadores de una serie de geoprocursos de transferencia espacial y de generación de nueva información geográfica:

El primer ejemplo que exponemos en esta se centra en la elaboración de un algoritmo previo que ayudará a de tramificación de la carretera según confluencia con laderas adyacentes (subyacentes y suprayacentes), esto es, una herramienta de carácter auxiliar que ayudará a precisar el carácter vulnerable de las diferentes fenomenologías del peligro anteriormente expuestas y que generará una unidad de síntesis, el tramo, que servirá como elemento evaluador sintético donde se deberán tomar medidas tras el aporte de la información geográfica de la peligrosidad analizada.

Este algoritmo permite dividir los ejes de la carretera (central y laterales) en función de las laderas adyacentes. Para ello se han proyectado los vectores perpendiculares al eje desde los vértices que separan cada una laderas y que coinciden con el borde de la plataforma de la carretera. La herramienta secciona el eje de la carretera según las laderas a ambos lados bien sean subyacentes (bajo la plataforma) o suprayacentes (sobre la plataforma) y por lo tanto creará la posibilidad de poder volcar la información de los distintos procesos geomorfológicos de transferencia espacial de materia y energía procedentes o derivados de las unidades de ladera. Para que se pueda realizar este proceso es fundamental que el borde de las laderas que coincidan con la plataforma no tenga espacios, algo que deberá desarrollarse previamente en el proceso de digitalización tanto de la ladera como de la propia plataforma.



**Figura 3.** Segmentación del eje central en segmentos según laderas, con tramo mínimo de 10 m. Fuente: Elaboración propia.

El resultado de aplicar este algoritmo mostrará una división del eje central de la carretera coincidente con las laderas que tiene a ambos lados del tramo como se puede apreciar en la figura 3.

El segundo de los algoritmos desarrollados mide la probabilidad alcance del terreno movilizado a la carretera, a diferencia del anterior este algoritmo sí que muestra un carácter predictivo en función de las características físicas de las laderas suprayacentes.

Para solventar las cuestiones relativas al alcance por movimientos gravitacionales de las laderas suprayacentes anexas a la carretera se ha procedido a aplicar el estudio desarrollado por Weme Nielsen (2008). De este trabajo de Weme se ha aplicado la ecuación denominada como “modelo  $\beta$ - $\Psi$ ” la cual deriva de la correlación observada entre el ángulo del talud ( $\Psi$ ) y el ángulo formado entre la cima de la ladera y el punto que alcanza el material desprendido ( $\beta$ ):

$$\beta = 3.926 + 0.768 \Psi$$

El ángulo de  $\Psi$  es el correspondiente al de la ladera. Este ángulo se obtiene mediante el empleo del mapa de pendientes, aplicando la siguiente corrección:

$$\text{Pendiente corregida} = \bar{x} + \left[ \left( \frac{\sigma}{25} \right) \right] * (MAX - \bar{x})$$

Donde:

$\bar{X}$  = valor medio de pendiente ladera.

$\sigma$  = desviación estándar media de ladera.

MAX = valor máximo de pendiente ladera.

Tras la aplicación de esta corrección al Modelo de Elevaciones (IGN) empleado se compara la distancia de avance de los materiales hacia la carretera con la distancia existente desde el borde de la ladera hasta la línea

exterior de la carretera (borde de la calzada) y el eje central de la misma. En función de la relación que exista entre estas distancias el algoritmo clasifica en las siguientes probabilidades de alcance:

- Baja probabilidad: si la distancia de avance de los materiales es inferior a la distancia hasta el borde de la calzada
- Media probabilidad: si la distancia de avance es superior a la distancia hasta el borde de la calzada aunque menor que la distancia desde el eje central de la calzada.
- Alta probabilidad: cuando el avance traspasa el eje central de la carretera invadiendo los dos carriles o calzadas dejando impracticable la circulación del tráfico.

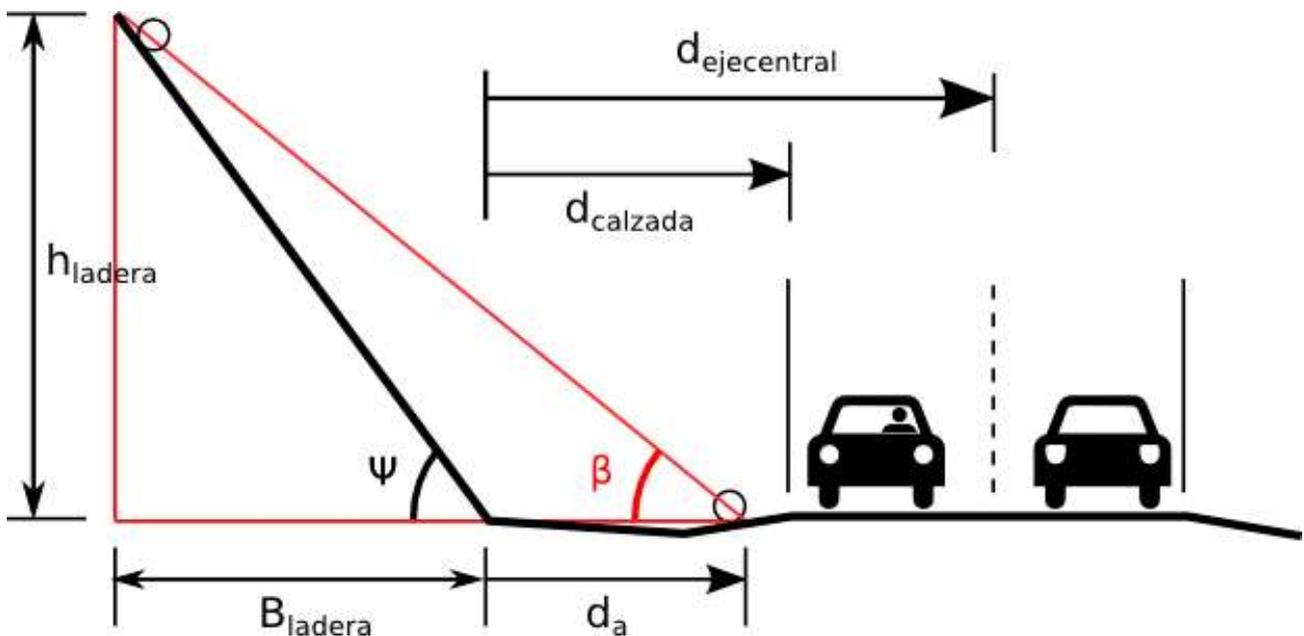


Figura 4. Variables del alcance. Fuente: Elaboración propia.

El resultado de este algoritmo nos arroja la posibilidad de prever medidas mitigadoras para las laderas suprayacentes y, en su defecto, contemplar la influencia que tendrá sobre el tráfico rodado de no tomarse las mismas más aún si nos encontramos en tramos de una intensidad media diaria o intensidad media diaria por horas elevada.

## 5. CONCLUSIONES

El entorno de una infraestructura viaria se caracteriza por la complejidad de las casuísticas que afectan a las laderas y, en general, al medio inmediato de la infraestructura, caracterizado por constituir un espacio de interfaz entre los desarrollos urbanos y el contacto con el medio físico. Este espacio de contacto ha llevado a que se deban desarrollar mecanismos muy perfilados de cálculo a la hora de proyectar futuras vías de comunicación ya que el espacio de desarrollo de estas vías suele estar caracterizado por grandes movimientos de tierra que, en medios como el Mediterráneo, generan un ambiente muy inestabilizado.

Los procesos geomorfológicos que afectan a la carretera tienen su origen en este espacio inestabilizado, pero, sin embargo, manifiestan sus consecuencias sobre la calzada y su entorno. Como fundamento conceptual se ha utilizado un modelo fundamentado en la idea de patrón espacial de los territorios de riesgo, que compartimenta el espacio en áreas causantes, líneas de transmisión de materia y energía, y áreas receptoras. Para analizar los procesos de transferencia espacial entre las áreas causantes y las receptoras, ha sido necesario habilitar una serie de procedimientos de cálculo y análisis espacial ad hoc. Los procedimientos

aplicados han resultado útiles tanto para la deducción de datos procedentes de las unidades espaciales causantes, como para la transmisión de los resultados de peligrosidad obtenidos en dichas unidades causantes, hacia las unidades receptoras. Los algoritmos y reglas de decisión utilizadas permiten obtener datos de peligrosidad sobre la carretera a partir de información procedente de la propia infraestructura y del entorno.

El problema al que nos enfrentábamos no disponía de una serie de herramientas concretas para solventar estas casuísticas y es por ello que se han desarrollado una serie de algoritmos y procedimientos basados en un entorno GIS de trabajo que sirva para diagnosticar y tomar decisiones por parte de los técnicos y gestores de proyectos de infraestructuras que presenten una caracterización similar.

## 6. AGRADECIMIENTOS

La presente comunicación se enmarca en el contexto del Proyecto de Investigación *“Elaboración de una metodología aplicada para la detección de puntos conflictivos en las infraestructuras viarias de áreas periurbanas andaluzas ante episodios de activación de riesgos sinérgicos asociados a lluvias torrenciales”*, dirigido por Perles Roselló, M.J. y financiado por la Agencia de Obra Pública y Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Bodoque et al. (2005): “Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: two examples from Central Spain”, *Catena* 64, 81-102.

Burton, A., Bathurst, J.C. (1998): “Physically based modelling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale”, *Environmental Geology* 35, 89-99.

Corominas, J. Ibarbia, I., Luzuriaga, S., Navarro, J.A., Jujo, I., Jurnet, C., Hurlimann, M. (2013): “Rockfall and debris flow hazard assesment of the coastal road of Guipuzkoa (Northern Spain)”, Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (eds.), *Landslides Science and Practice*, vol. 6, Risk Assesment, Management and Mitigation. Ed. Springer. Germany.

Delmonaco, G.; Margottini, C. Y Spizzino, D. (2006): “Report on new methodology for multi-risk assesment and the harmonisation fo different natural risk maps”, ARMONÍA Proyect. Applied multi-risk mapping of Natural Hazards for Impact Assessment. Del. No 3.1. European Community.

Flanagan, S. A., Furniss, M. J., Ledwith, T. S., Thiesen, S., Love, M., Moore, K. and Ory, J. (1998): “Methods for inventory and environmental risk assessment of road drainage crossings”. US Department of Agriculture, Forest Service. Research Paper, 9877-1809.

GRASS Development Team (2016): “Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.0”. Open Source Geospatial Foundation. Disponible en: <http://grass.osgeo.org>

IGN - Instituto Geográfico Nacional [en línea]. Modelo Digital del Terreno con resolución de 5 metros (MDT5). Disponible en: <http://www.ign.es>

Kumpulainen, S. (2006). “Vulnerability concepts in hazard and risk assesment. Natural and technological hazard and risks affecting the spatial development of European regions”, Geological Survey of Finland, Special Paper 42, 65-74.

Lari, S., Crosta, G.B., Frattini, P. y Agliardi, F. (2008): “A probabilistic local-scale multi-risk analysis”, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-. Milán.

Ministerio de Fomento (2014): “Mapas de tráfico”. Disponible en: <http://goo.gl/sXyTyj>

Perles Roselló, M.J. y Mérida Rodríguez M.F. (2010): “Patrón territorial y conformación del riesgo en espacios periurbanos. El caso de la periferia este de la ciudad de Málaga”, *Revista Scripta Nova*, vol XIV, Barcelona.

Perles Roselló, M.J. y Cantarero Prados, F. (2010): "Problemas y retos en el análisis de los riesgo múltiples del territorio: propuestas metodológicas para la elaboración de cartografías multi-peligros". Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles (BAGE), nº 52, p245-271, Madrid.

Perles Roselló (2010): "Apuntes para la evaluación de la vulnerabilidad social frente al riesgo", Baética nº 32, pags. 67-87, 2010 ISSN: 0212-5099.

Pedraza, J.; Carrasco, R.M.; Bodoque, J.M; Sanz, M.A.; Martín-Duque, J.F.; González, A. y Díez, A. (2004): "The Jubaguerra stream event: analysis of a mass movement connected with a flash flood phenomenon and its application to other areas in the Gredos Mountains (Central Spain)", C.A. Brebbia (ed.), Risk Analysis IV. Wessex Institute of Technology (WIT Press), Southampton, United Kingdom, pp. 45-358  
Prasad, A. 2007. A tool to analyze environmental impacts of roads on forest watersheds (Tesis doctoral, Utah State University, USA).

Prasad, A., Tarboton, D. G., Luce, C. H., and Black, T. A. (2005): "A GIS tool to analyze forest road sediment production and stream impacts". ESRI International User Conference Proceedings: July 25-29, 2005, San Diego, Calif. Redlands, CA

Weme Nielsen, M. (2008). Modelling of rockfall runout range. Employing empirical and dynamical methods. Tesis de máster.