

# METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE TRAMOS DE CONCENTRACIÓN DE DESLIZAMIENTOS EN LA RED DE CARRETERAS GESTIONADAS POR LA GENCAT.

Illán Paniagua(1), Eugenia Álvarez (2), Albert Gómez (3), Pablo Fernández (4), José Antonio Martín-Caro (5)

(1) Ines Ingenieros Consultores  
Departamento de geotecnia  
ips@inesingenieros.com

(2) Generalitat de Catalunya  
Tècnic de la Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat  
eugenia.alvarez@gencat.cat

(3) Generalitat de Catalunya  
Subdirector general d'Explotació Viària  
albert.gomezametller@gencat.cat

(4) Ines Ingenieros Consultores  
pfq@inesingenieros.com

(4) Ines Ingenieros Consultores  
Director ejecutivo  
jmc@inesingenieros.com

## RESUMEN

*La Dirección General de Infraestructuras de Movilidad (DGIM) de la Generalitat de Catalunya utiliza el concepto de “Trams de Concentració d’Esllavissades” (TCE), para referirse a los tramos de concentración de deslizamientos que han afectado a su red viaria. Esta idea está asociada a la existencia de secciones de carretera donde el riesgo de que se produzcan incidencias por deslizamiento de taludes es mayor que en otras de similares características. Es un concepto ligado estrechamente a la política de gestión y mantenimiento de la Red y la seguridad viaria.*

*El artículo describe y compara distintas metodologías previas de identificación de TCE y el método vigente: basado en el análisis de funciones de distribución de datos que no tienen comportamientos estadísticos paramétricos y utilizar umbrales mediante métodos no deterministas para establecer qué valores son anormalmente altos. Este último se trata de un procedimiento implantado que se soporta por una muestra de 5.566 registros de incidencias de esta tipología entre enero de 2001 y junio de 2021. El artículo concluye con el plan de implementación de esta herramienta en la estrategia del mantenimiento de los taludes de la red catalana.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En mayo de 2021 INES Ingenieros Consultores fue adjudicatario del contrato “Desarrollo de la metodología de cálculo de los tramos de concentración de deslizamientos en la red de carreteras de la Generalidad de Cataluña”. De acuerdo con este contrato, la Dirección General de Infraestructuras de movilidad (DGIM) de la Generalidad de Cataluña (GENCAT) encarga la revisión y análisis de las propuestas de cálculo de los tramos de concentración de desprendimientos (TCE) que se exponen en el apartado de experiencias previas; su comparación y, en base a éstas, el diseño de una propuesta metodológica que pueda ser implementada en su red, su prueba con datos reales, el ajuste y el calibrado de la misma.

Los datos de las incidencias en la red, provocados por desprendimientos y deslizamientos, se recogen en una de las base de datos que alimentan el Sistema de Gestión de Activos Geotécnicos de la DGIM. La principal fuente de información es el Centro de Control Viario de la Generalitat de Catalunya, ente responsable de recoger, tramitar y hacer el seguimiento de la información sobre les incidencias en la red viaria. Otras fuentes de información son Protección Civil, Agentes rurales, Institut Geològic de Catalunya, Ayuntamientos, usuarios de la carretera, etc...

El artículo expone la revisión de las distintas propuestas metodológicas consideradas para el cálculo de los tramos de concentración de deslizamientos “TCE”, se detalla la propuesta diseñada y se muestra cómo integrar esta herramienta en la gestión de los taludes que lleva a cabo la DGIM-GENCAT.

## 2. EXPERIENCIAS PREVIAS

Las metodologías consideradas se agrupan en:

- Metodología de la ventana flotante para la identificación de TCAF- IAAF
- Metodología del estudio de desprendimientos en la red de carreteras GENCAT para la identificación de TCE
- Metodología KDE+ del CDV - Transport Research Centre (Chequia)

### **Metodología de la ventana flotante para la identificación de TCAF- IAAF**

El documento [1]: “Metodología para el estudio de identificación de los tramos de concentración de accidentes frontales (TCAF) y los itinerarios de acumulación de accidentes frontales (IAAF) de la red de carreteras de la Generalidad de Cataluña” analiza la frecuencia de accidentes frontales o frontolaterales en una muestra o tramo de longitud variable.

Los datos de partida son los accidentes con resultado de víctimas mortales, graves o leves registrados en el período entre 2012 y 2016 ( los estudios de accidentes suelen ser de 5 años) Sobre cada carretera se identifican el número de accidentes en una “ventana” o “muestra flotante” que se establece entre intersecciones de carreteras, considerando cada calzada como única. En función de las frecuencias que se obtienen por carretera, se define un umbral conforme a una distribución binomial negativa (BN). Finalmente, el valor se mayor por la gravedad del accidente, dando más importancia a los accidentes de mayor gravedad.

Para determinar el umbral a partir del cual se considerará que un tramo ha registrado una accidentalidad extrema, los datos de accidentalidad se ajustan a una distribución estadística teórica que previamente debe definirse. El umbral corresponde al intervalo de confianza de la función teórica ajustada. El procedimiento establece el estudio de la frecuencia del suceso “accidente relacionado con deslizamiento” mediante el establecimiento de un muestreo / ventana variable. Esta segmentación consiste en subdividir la red en tramos dinámicos por tanteo con pequeños solapamientos entre ellos de cierta distancia, solapándose entre sí. En cada ventana se comprueba si se cumplen los criterios definidos para identificar el tramo como TCA y posteriormente se combinan todos los tramos que queden superpuestos y que superen el umbral definido para obtener un TCA conjunto.

Se define la longitud de ventana en función del tipo de problemas que se deseen detectar: longitudes cortas de ventana permiten identificar tramos con problemas locales de accidentalidad, mientras que una mayor longitud es mejor para identificar itinerarios largos con problemas generales de accidentalidad. Se proponen realizar, por tanto, dos análisis con longitudes de ventana diferente: ventanas flotantes de 5 Km de longitud para los IAAF y de 1 Km de longitud para los TCAF, siendo el solapamiento entre ventanas de 100 m.

La propuesta para una ventana flotante de 5 Km ajusta la frecuencia y gravedad de los accidentes frontales a una distribución binomial negativa (BN), mediante el gráfico de Skewness-kurtosis y con el test Chi-cuadrado. Utilizando la función de densidad de la distribución BN se obtienen los parámetros de ajuste, parámetro de escala ( $n$ ) y media ( $\mu$ ) y con ellos se calculan los cuantiles del número de accidentes (frecuencia) y número de accidentes ponderados (gravedad) para los distintos valores de probabilidad. Finalmente, se utiliza el cuantil para el nivel de confianza del 99% como umbral para determinar los tramos con exceso de concentración de accidentes.

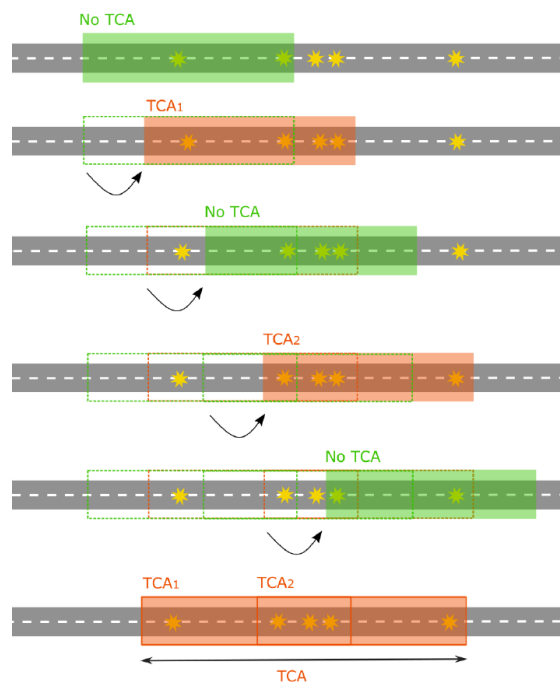


Figura nº 1. Proceso de identificación de tramos TCA a partir de la ventana flotante. Fuente: Estudi Gencat [1]

La ponderación de los accidentes por gravedad consiste en aplicar un peso específico distinto a cada suceso en función de su gravedad (accidente mortal, grave o leve). Para jerarquizar los distintos tramos obtenidos entre sí (IAAF y TCAF) se utiliza el índice de gravedad (IG) con una fórmula que da un peso exponencial a los accidentes mortales.

De este método se destaca:

- La identificación de tramos teniendo en cuenta la gravedad del accidente. Se dota de pesos específicos a los accidentes mortales, graves o leves a la hora de decidir los umbrales para considerar el tramo como TCA (umbrales de frecuencia y umbrales de gravedad) y para jerarquizar los distintos tramos entre sí.
- El objeto del uso de esta metodología, según la frecuencia y gravedad de la incidencia, era averiguar si se ajustaba a una distribución binomial negativa (BN), mediante el gráfico de Skewness-kurtosis y con el test Chi-cuadrado. Finalmente se descartó, ya que en el momento de su desarrollo, no se disponía de una población de datos suficiente para su aplicación.
- El cálculo de probabilidad para establecer el umbral se realiza “manualmente”, sin apoyo de un software específico que lo automatice.

### **Metodología del estudio de desprendimientos en la red de carreteras de la GENCAT para la identificación de TCE**

El estudio “Metodología sobre desprendimientos en la red de carreteras de la Generalidad de Cataluña”, es un documento interno de la Dirección General de Infraestructuras de Movilidad Terrestre (DGIM) en el que se detallan los resultados de los estudios y evaluaciones realizadas en la identificación de Tramos de Concentración de Desprendimientos (TCE). Para su cálculo se revisan datos estadísticos de la población de incidentes relacionados con deslizamientos de talud o ladera, se muestran los TCE identificados sobre el mapa de la red de carreteras de la Generalidad de Cataluña y se proponen actuaciones. En este documento también se resume el Sistema de Gestión de Taludes de GENCAT y el protocolo de información de siniestros a causa de caídas de bloques.

Los tramos TCE identificados en el estudio anterior se han obtenido empleando una ventana fija de 5 000 m, en los que se determina el número de incidencias ocurridas y, finalmente, se clasifican únicamente en función del número de eventos ocurridos.

La metodología emplea longitudes de ventana fijas, no realiza un ajuste estadístico de los datos para obtener el umbral con el que considerar el tramo como TCE; simplemente ordena todos los tramos de mayor a menor número de incidencias y establece distintos rangos (clasificados por colores) para priorizar entre ellos. No considera la gravedad de las incidencias, pues los datos de los que se dispone en este tipo de incidencias no suelen recoger datos sobre la magnitud del deslizamiento o los daños ocasionados.

Los tramos TCE que se obtienen por esta metodología se muestran en las siguientes figuras. El número de tramos identificados alcanza el 74.5% de la red de carreteras con titularidad GENCAT.

Esto se debe al uso de intervalos fijos de 5 km como unidad de análisis en la que se determina si se supera el umbral (también fijo) para considerar el tramo como TCE.

CARRETERA	PK I	PKF	MUNICIPI	NÚMERO INCIDENCIAS
BP-1103	0+000	7+000	Montserrat	25
C-28	38+522	43+522	Naut Aran	22
C-55	15+290	20+290	Monistrol de Montserrat	21
C-31	170+283	175+283	Costes del Garraf	18
C-31	167+151	172+152	Costes del Garraf	18
C-16	101+536	106+536	Berga -Cercs	15
C-14	161+308	166+308	Organyà	14
C-13	137+200	142+200	Rialp -Llavorsí	14
C-13	132+200	137+200	Sort-Rialp	14
C-13	67+200	72+200	Vilanova de Meià -Camarasa	11

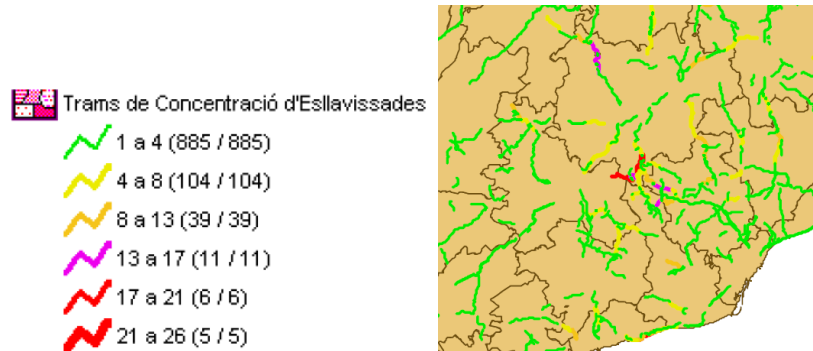


Figura nº 2. Identificación de tramos TCE y clasificación por número de incidencias. [2]

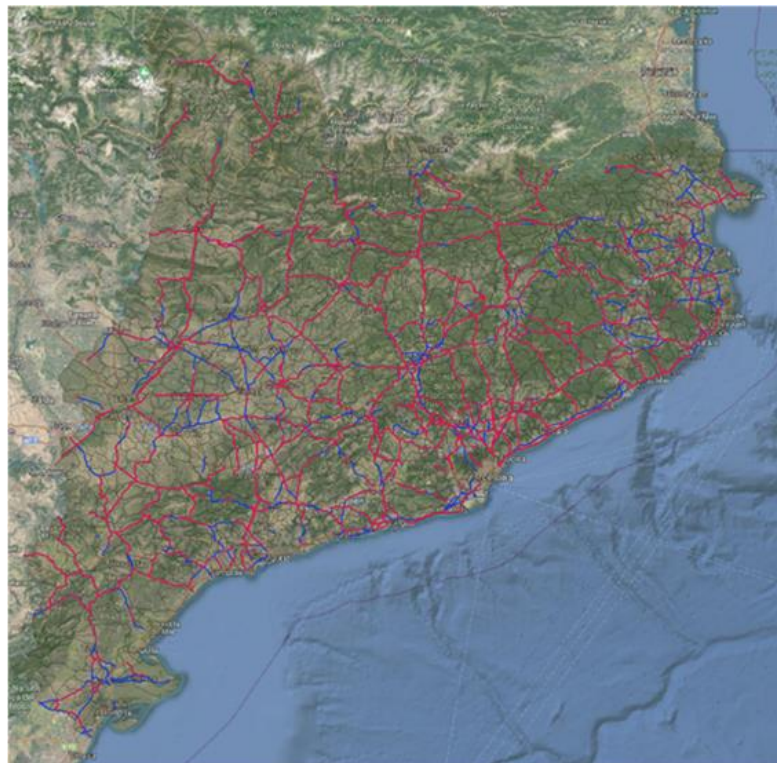


Figura nº 3. Identificación obtenidos con Metodología del estudio de desprendimientos en la red de carreteras de la GENCAT para la identificación de TCE

## Metodología KDE+ del CDV - Transport Research Centre (Chequia)

El método se expuso en el Journal of Environmental Management y se basa en el uso del software KDE+ desarrollado por el CDV (Transport Research Centre de Chequia), para la detección de tramos de concentración de accidentes provocados por colisiones con animales ungulados, que busca identificar la densidad a lo largo de la traza de un fenómeno a priori aleatorio, como pueden ser la concentración de deslizamientos.

El objetivo de este estudio es demostrar que la forma más efectiva de identificar las zonas de mayor densidad es dividir las carreteras en dos grupos: los llamados clúster, que representan tramos estadísticamente significativos en cuanto a la aparición de accidentes, y otros tramos en los que se producen accidentes que se consideran aleatorios, no provocados por factores locales relevantes.

El método estadístico usado en este estudio para identificar estas agrupaciones (clusters) es el Kernel Density Estimation (KDE), que estima la función de densidad de probabilidad de los datos de partida (en nuestro caso, accidentes provocados por desprendimientos) y utiliza simulaciones de Monte Carlo para calcular el umbral a partir del cual los tramos que se ubican estos sucesos se consideran estadísticamente relevantes. Los tramos relevantes obtenidos se jerarquizan entre sí mediante el término de fortaleza (strength) de cada cluster, valor que da una idea de cuánto se incumple la hipótesis de que los accidentes se distribuyen uniformemente a lo largo de la carretera. Por tanto, el término “strength” depende del número total de accidentes y de cómo éstos se posicionan a lo largo de la carretera.

El estudio pretende destacar comportamientos singulares dentro de un tramo de red. El tramo de la red tiene unas características que aplican en toda la longitud de la carretera, mientras que los comportamientos singulares afectan a puntos concretos del tramo de red, y son las zonas que interesa identificar por destacar respecto a la población general. El estudio justifica que los “cluster” con mayor fortaleza de los obtenidos utilizando el método KDE, los que presentan gran densidad de accidentes, se producen en zonas fuertemente influenciadas por factores locales. Este tratamiento estadístico reduce el efecto de falta de coherencia del dato o su inexistencia, situación común en el caso del registro de accidentes de tráfico.

Una vez obtenidos los tramos clúster, el estudio propone identificar las causas / factores (globales y locales) que producen accidentes en cada clúster, ver figura nº4. La identificación de los factores se realiza mediante visita de personal especializado a las zonas TCE identificadas, mediante el uso de ortofotos, Google StreetView u otra información digital disponible. Una vez identificados, el siguiente paso de los definidos por este estudio es realizar un modelo de regresión para obtener entre ellos los factores locales estadísticamente relevantes.

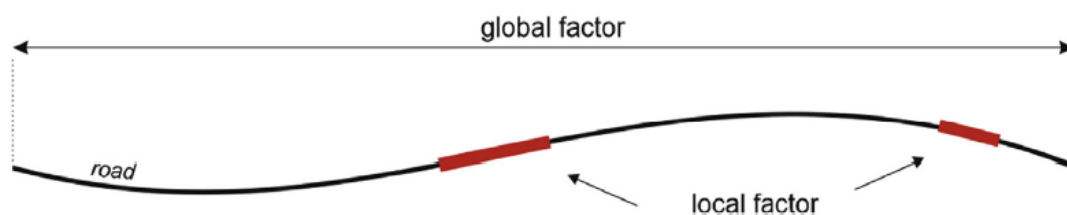


Figura nº 4. Factores globales – características generales y particulares (locales).

Este método ha sido aplicado sobre el registro de incidencias por deslizamiento en el conjunto de la red de carreteras de la Generalidad de Cataluña, se han obtenido 3541 incidencias incluidas dentro de tramos clúster, lo que representa un 65% del total. Sin embargo, el sumatorio de longitudes de todos los clúster es de 380.10 km, lo que representa sólo un 6.8% de los aproximadamente 5600 km que forman el total de carreteras de la red gestionada por la Generalitat.

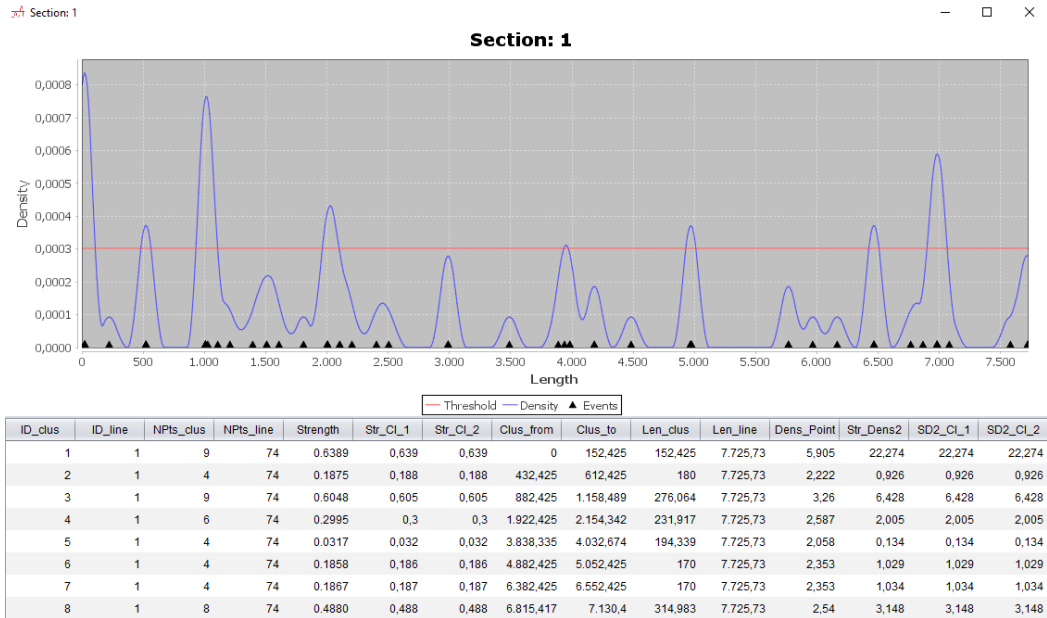


Figura nº 5 Identificación de clústeres para la carretera BP-1103. Software KDE+



Figura nº 6. Identificación de tramos TCE mediante el uso del software KDE+.

### 3. PROPUESTA METODOLÓGICA

En vista de la revisión de los métodos anteriores y del análisis de sus ventajas e inconvenientes, se propone seguir una metodología para identificar los tramos de concentración de incidencias (TCE) que combine los beneficios de cada una.

Por un lado, el uso de la metodología detallada en el estudio de la Generalidad de Cataluña [1] tiene la clara ventaja de jerarquizar los diferentes tramos en función de su gravedad para los accidentes frontales (TCA), aspecto que no tiene en cuenta el método KDE. Sin embargo, este último tiene la ventaja operativa de realizar el cálculo del umbral para considerar tramos TCE de longitud variable, de manera automatizada, mediante métodos estadísticos, no tan sensibles a la calidad del dato, que permiten determinar la importancia (o fortaleza) de cada uno de ellos, en base a qué es significativo en cada tramo de carretera.

Aunque en el caso de la identificación de tramos de concentración de desprendimientos (TCE) no se puede utilizar el factor de la gravedad de un posible accidente debido al desprendimiento para jerarquizar los distintos tramos entre sí, sí que se podrían recoger los datos de las incidencias que reflejen la magnitud del suceso, a fin de jerarquizar los tramos en función de si la incidencias relacionadas con deslizamientos han tenido un impacto mayor o menor en el nivel de servicio de la carretera.

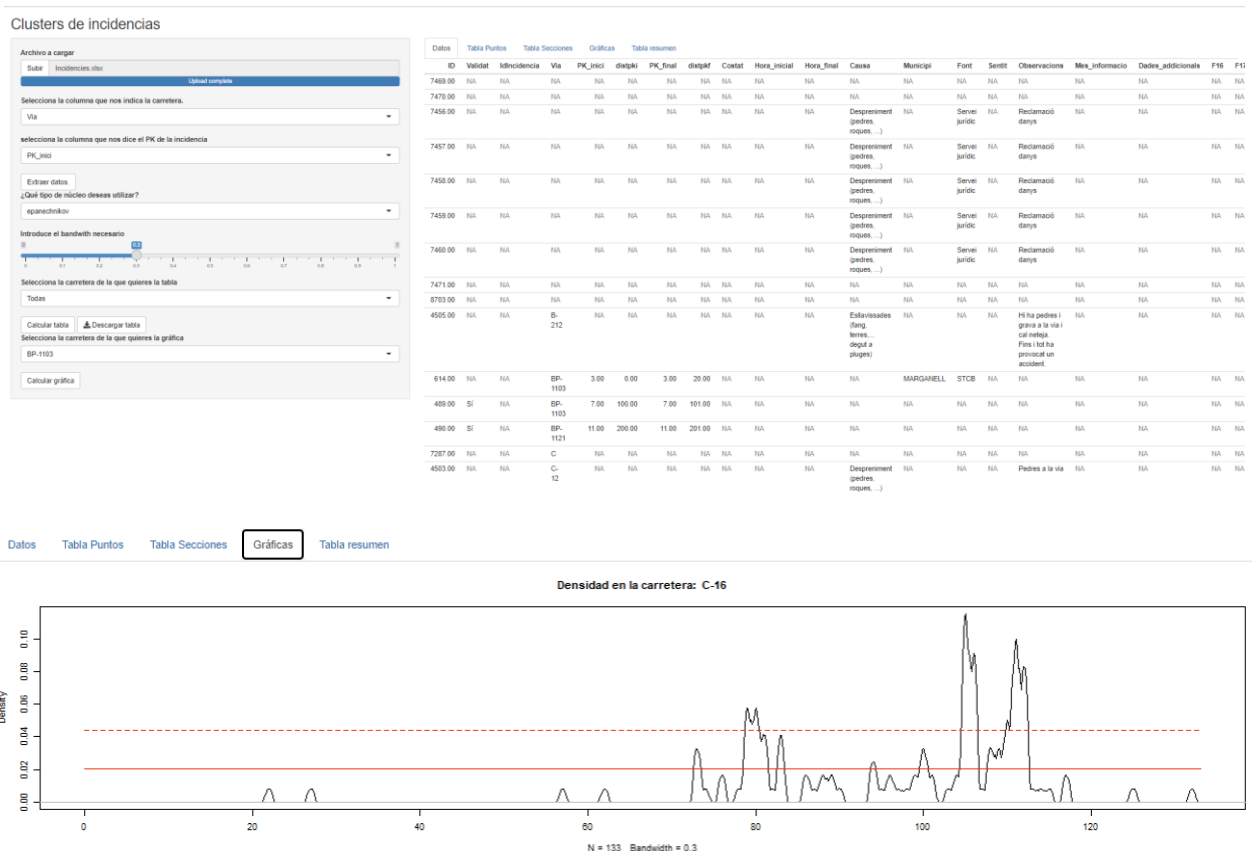


Figura nº 7. Vista de la carga de datos y distribución de frecuencias en la C-16 y determinación de umbrales



Por tanto, con las premisas indicadas, la metodología recomendada surge de combinar ambos procedimientos: por un lado, tomar datos que representen la magnitud de los desprendimientos (como puede ser el volumen de material caído, las características de este material, la existencia de reclamación de daños por parte de los usuarios, etc.) en los datos de partida de las carreteras de la Generalidad de Cataluña, que permitan asignar diferentes pesos específicos a cada suceso para poder calibrar los tramos obtenidos y jerarquizarlos por su magnitud; y por otra parte, aplicar criterios de densidad de Kernel para obtener la densidad de accidentes con deslizamiento y aplicar el método de Montecarlo para identificar los tramos singulares dentro de ese entorno, fijando automáticamente el umbral a partir del cual se identifican como TCE y clasificando la importancia de estos tramos en función de la posición relativa de los tramos accidentes registrados. El procedimiento ha sido automatizado y programado para su utilización directa según se actualizan los datos de registro.

Para tener en cuenta la importancia de cada tramo identificado en relación a los tramos del resto de carreteras de la red, consideraremos relevantes los clústeres cuyo término de fortaleza supere el cuantil del 10%, que corresponde a un valor de 0.18 de fortaleza. Los tramos cuya fortaleza sea inferior a este valor se considerarán como estadísticamente no relevantes, y no se tendrán en cuenta como TCE salvo que la magnitud de las incidencias acaecidas en ellos sea elevada, de acuerdo con lo descrito más adelante.

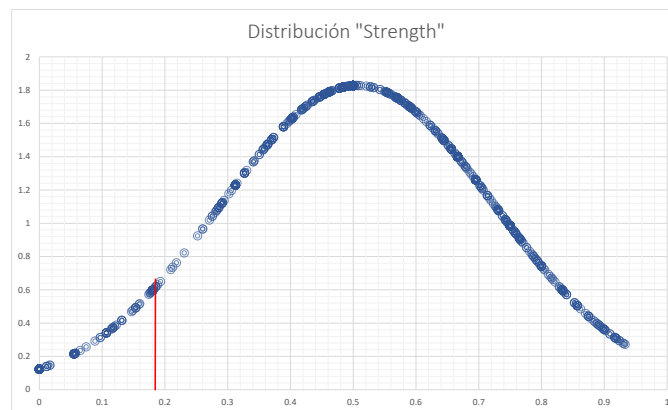


Figura nº 8. Distribución del valor de fortaleza de cada clúster.

Por otro lado, mediante el uso de este método queremos tener en cuenta no sólo la frecuencia de las incidencias sino también su gravedad, que serán definidas en términos de la magnitud del desprendimiento, por lo que se busca jerarquizar los tramos obtenidos anteriormente, además de por el número de accidentes y de su posición relativa, por la magnitud del desprendimiento o impacto que ha tenido cada incidencia producida en el tramo en la funcionalidad y seguridad de la carretera.

Sin embargo, de cara a este último análisis de magnitud del suceso, se ha destacado que sólo una pequeña parte de los datos de partida disponibles incluyen datos de la magnitud de las incidencias registradas, estas vienen dadas en forma de registros de reclamaciones de daños por parte de los usuarios o, en algunos casos, con los volúmenes del material caído en la carretera.

El criterio elegido para jerarquizar los tramos por la magnitud del desprendimiento ha sido la existencia o no de reclamación de daños por parte de los usuarios a consecuencia de la incidencia,

puesto que es el criterio más objetivo para tener en cuenta el impacto, y por presentar un mínimo de registros en los datos de partida (en 350 de 5566 incidencias registradas). Pese a que se trata de pocos registros de reclamación de daños respecto al total de incidencias, se han preparado las herramientas informáticas para realizar el cálculo teniendo en cuenta este criterio de jerarquización una vez su registro esté más generalizado.

Por eso esta causa se propone utilizar el concepto de índice de gravedad (IG) del tramo, descrito en el estudio [1], pero esta vez referido a la gravedad del tramo TCE en cuanto a la magnitud de los desprendimientos ocurridos en él. Para ello, se ha calculado para cada tramo clúster identificado el número de incidencias producidas con reclamación de daños y se ha calculado el índice de gravedad (IG) dando un peso lineal a cada una de las reclamaciones de daños producidas y normalizando los resultados.

El índice de gravedad calculado tiene una doble finalidad: por un lado, sirve para calibrar los resultados del análisis de frecuencia de las incidencias, tal y como se ha avanzado anteriormente, permitiendo identificar cómo TCE aquellos tramos que, aunque tienen una fortaleza inferior al cuantil del 10% por tener pocas incidencias o por ser éstos muy homogéneos, tienen un índice de gravedad superior al cuantil del 50% de los valores del IG (lo que equivale en la práctica a que éstos obtengan alguna reclamación de daños en el tramo). Por otro lado, este índice sirve para jerarquizar los distintos tramos TCE entre sí y priorizar la adopción de medidas de mitigación.

En la siguiente tabla se muestra un extracto de los resultados obtenidos de la identificación de los TCE mediante la metodología propuesta, después de un análisis por frecuencia y por gravedad.

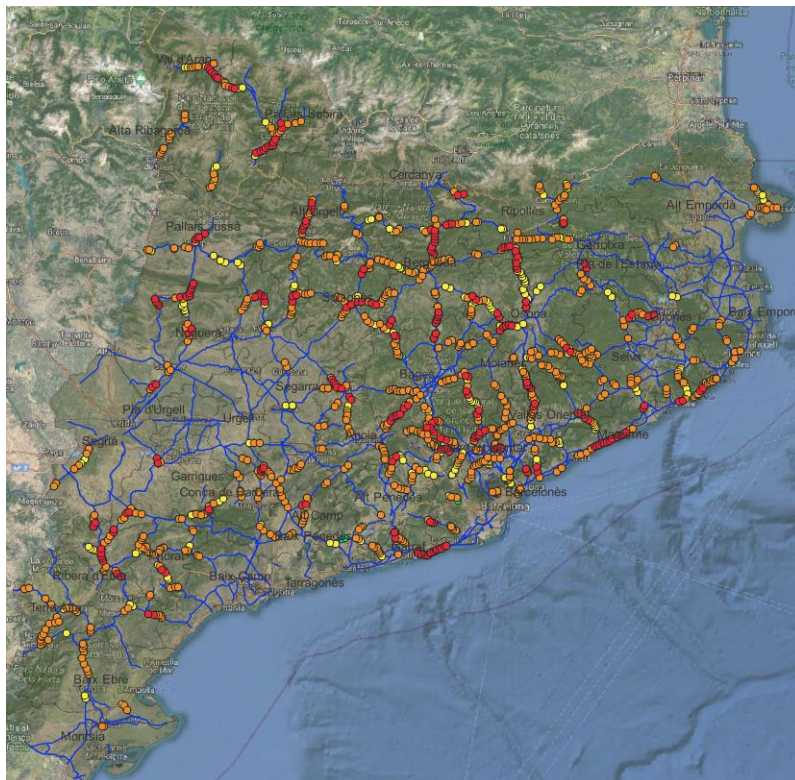


Figura nº 9 Jerarquización de los tramos TCE según la gravedad de los de las incidencias.

#### 4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se han analizado y comparado diversas propuestas de cálculo para la identificación de tramos de concentración de desprendimientos (TCE), a partir de los datos de eventos en la red relacionados con deslizamientos que se registran en las bases de datos de incidencias del Sistema de Gestión de activos geotécnicos de la GENCAT.

El apartado metodologías previas expone los resultados de aplicación con datos reales de 5566 incidencias entre enero de 2001 y junio de 2021 en las carreteras gestionadas por la Generalitat de Catalunya.

Tras el análisis previo, se propone una metodología que se basa en identificar tramos con mayor densidad de incidentes aplicando métodos estadísticos basados en los criterios de densidad de Kernel, para conocer la distribución de accidentes en una carretera y utilizando simulaciones de Monte Carlo para calcular el umbral a partir del cual los tramos en los que se ubican estos sucesos se consideran estadísticamente relevantes; fijando de forma automática el umbral a partir del cual se identifican los tramos como TCE, y clasificando la importancia de estos tramos en función de la magnitud del suceso: volumen deslizado y su impacto en la circulación.

Aplicando esta metodología se han identificado 1019 clústeres (tramos de concentración de incidencias) en el total de carreteras, tramos en los que se han detectado 3541 de incidencias, un 65% del total registrado, en una suma de longitudes de sólo un 6.8% del total de la red de carreteras GENCAT.

Una vez identificados estos tramos, se han calibrado los valores de su fortaleza en términos de la frecuencia de incidencias teniendo en cuenta los resultados del conjunto de tramos de la red de carreteras, considerando como TCE aquellos tramos cuya fortaleza supera el valor del cuantil del 10%. Asimismo, se ha calculado el índice de gravedad de cada tramo para tener en cuenta la magnitud de los sucesos en los TCE detectados, aquellos tramos en los que, pese a no cumplirse el criterio anterior, tienen un índice de gravedad superior al cuantil del 50%: equivalente a tramos en los que se ha producido alguna reclamación de daños como consecuencia de las incidencias por deslizamiento.

El procedimiento se ha mecanizado mediante un software específico que realiza el proceso automáticamente cuando se carga el registro de datos actualizado en la red.

Este proceso permite obtener un registro georeferenciado del histórico de incidentes la red, un concepto ligado estrechamente a la política de gestión y mantenimiento de la Red y la seguridad viaria. Lo que está permitiendo el depurado, contraste y mejora del sistema de gestión de activos GENCAT mediante tres líneas de trabajo principales:

- Identificación de la falta elementos de inventario prioritarios. Las localizaciones de los TCE son contrastadas con la ubicación de los activos, detectándose zonas a inventariar y evaluar.

- Comprobación de la calidad de los datos de la base de datos del sistema de gestión. Los datos de TCE permiten el contraste real con los datos existentes en la BBDD y la evaluación que realiza el algoritmo de evaluación del sistema de gestión de taludes GENCAT.
- Obtención de un valor cuantitativo para el indicador histórico de incidentes previos del algoritmo de evaluación del riesgo en el que se apoya la gestión de activos geotécnicos. Hasta la fecha este indicador se soportaba por el resultado de una matriz atributiva que jerarquizaba la frecuencia y magnitud de incidencias en cuatro categorías.

## REFERENCIAS

- Bíl, M., Andrášik, R., Duľa, M., Sedoník, J., 2019. *On reliable identification of factors influencing wildlife-vehicle collisions along roads*. Journal of Environmental Management 237C, 297-304
- Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat, Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya, març de 2019. *Estudi d'identificació dels trams de concentració d'accidents frontals i itineraris d'acumulació d'accidents frontals de la xarxa de carreteres de la Generalitat de Catalunya (2012-2016)*.
- Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat, Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya, maig de 2015. *Estudi de despreniments a la xarxa de carreteres de la Generalitat de Catalunya*.
- Paniagua, I. Álvarez, E. 2017. Metodología de gestión de taludes en desmonte en la Red Carreteras de la GENCAT: experiencia en la aplicación. IX Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Santander.
- Paniagua, I. Álvarez, E. Martín-Caro, JA. 2018. Geotechnical Asset Management System along Generalitat de Catalunya (GENCAT) Road Network. IV International Seminar on Earthworks in Europe. Madrid.