

Diseño y aplicación de un modelo difuso para el estudio de la estabilidad de taludes en terrenos volcánicos

Escuela de Doctorado y Estudios de Posgrado

Máster en Gestión e Innovación Tecnológica en la Construcción

Autores:

Estudiante Ana Miranda Hardisson

Tutor/a Eduardo González Díaz

Co-tutores Francisco Javier Jubera Pérez
Luis E. Hernández Gutiérrez

Junio 2018

D. Eduardo González Díaz, con N.I.F. 43794354-P, profesor del área de Construcciones Arquitectónicas del Departamento de Técnicas y Proyectos en Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de La Laguna y D. Javier Jubera Pérez con N.I.F. 42082702-Q, jefe del Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción del Gobierno de Canarias.

HACEN CONSTAR que la presente memoria titulada: **“Diseño y aplicación de un modelo difuso para el estudio de la estabilidad de taludes en terrenos volcánicos”**.

Ha sido realizada bajo su dirección por Dña. Ana Miranda Hardisson con N.I.F. 54062722-A.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente y a los efectos oportunos firman la presente en La Laguna a 31 de mayo de 2018.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 1297490

Código de verificación: TcMpgb3g

Firmado por: Eduardo González Díaz
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 31/05/2018 14:30:47

Este documento ha sido firmado electrónicamente por:

FRANCISCO JAVIER JUBERA PEREZ - J/SRV.LABORATORIOS Y CALIDAD CONSTRUC.

Fecha: 31/05/2018 - 15:05:30

En la dirección https://sede.gobcan.es/sede/verifica_doc puede ser comprobada la autenticidad de esta copia, mediante el número de documento electrónico siguiente:
0dU401UEfixEHpbXijF2xg0YlMzReTgmT



El presente documento ha sido descargado el 31/05/2018 - 15:05:51

Agradecimientos

Quiero dejar constancia de mi gratitud hacia todos aquellos que han colaborado en la realización de este Trabajo Fin de Grado, y que de alguna manera me han ayudado y animado a llevarlo a cabo:

En primer lugar me gustaría dar las gracias a mi tutor académico, Eduardo González Díaz, profesor del área de Construcciones Arquitectónicas del Departamento de de Técnicas y Proyectos en Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de La Laguna, por su amabilidad, sabiduría y disposición. Muchísimas gracias, Eduardo.

A todo el equipo MACASTAB, en especial a Luis González de Vallejo y Luis Hernández Gutiérrez, porque desde luego sin ellos no podría haber hecho nada de esto, me han enseñado y apoyado muchísimo. A Javier Jubera Pérez, tutor externo y jefe del Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción de la Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias, por la oportunidad y la facilidad. De verdad, muchas gracias a los tres.

A Silvia Alayón Miranda por iluminarnos con la lógica borrosa, atendernos en todo momento, y ser tan genial.

A mis padres porque estuvieron, están y sé que estarán siempre apoyándome y animándome en todas mis decisiones. En especial agradecer a Héctor, por su apoyo en este primer año de matrimonio entre libros, clases y ordenadores.

No puedo dejar de agradecer inmensamente a INVOLCÁN, mi jefe Nemesio Pérez y todos los compañeros, por darme esta oportunidad y todas las facilidades del mundo para conseguir esto. Mil gracias.

Resumen

En este trabajo se diseña un método de evaluación de la estabilidad de taludes volcánicos mediante un sistema borroso basado en reglas, a partir de los parámetros específicos de estos terrenos y sus características, que permitirá conocer el Índice de Susceptibilidad de Taludes en terrenos Volcánicos (ISTV). Se describe el diseño del sistema difuso para el cálculo del ISTV, así como la metodología a seguir para la toma de datos e introducción de los mismos en el sistema de lógica borrosa o difusa y obtención del ISTV.

Para ello se han estudiado y definido los parámetros que condicionan la estabilidad en terrenos tan heterogéneos como son los volcánicos, se han definido las reglas lingüísticas que relacionan los parámetros entre sí y componen el sistema de lógica difusa y se ha implementado el método en seis taludes con características distintas.

El objetivo es que exista una herramienta que permita que personal no cualificado introduzca los datos como haría un experto pero a la vez permitiendo reflejar la percepción de cada individuo frente a un mismo parámetro. El ISTV ofrece una valoración de la susceptibilidad de los taludes a sufrir inestabilidades y permite ordenarlos en función de esta para priorizar su estudio según el grado de susceptibilidad obtenido.

Palabras clave: Estabilidad de taludes, Desprendimientos, Taludes, Terrenos volcánicos, Lógica difusa, Lógica borrosa.

Abstract

This paper has conducted a design of an evaluation method for volcanic rock slopes stabilities using a fuzzy set system based on rules, using the specific parameters of volcanic materials and their characteristics, which allows knowing the susceptibility index of the slopes in volcanic materials (ISTV, of its initials in Spanish). The design of the fuzzy system to calculate the ISTV, as well as the methodology that guides through the data collection and their introduction in the fuzzy logic system to obtain the ISTV are described.

For that purpose, the parameters that determine the stability of this kind of heterogeneous terrains has been studied, and the linguistic rules that relate the parameters between each other, as well as the fuzzy logic system have been established. Also, the method has been implemented in six rock slopes with different characteristics.

The target is to create a tool that enables non-qualified personnel to obtain and introduce the data in the system as an expert would do. The ISTV offers an evaluation of the susceptibility of the slopes to the instabilities and allows them to be ordered in a database to prioritize their study according to the degree of susceptibility obtained.

Keywords: Slope stability, Rock Falls, Slopes, Volcanic Rocks, Fuzzy Logic.

Índice

1. Introducción	7
1.1. Antecedentes	7
1.2. Objetivos	8
1.3. Hipótesis	9
2. Estudios previos	9
3. Marco teórico.	10
3.1. Unidades geotécnicas y clasificaciones características de terrenos volcánicos.	10
3.2. Lógica difusa	13
4. Metodología ISTV	16
4.1. Definición de los parámetros del ISTV	22
4.1.1. Factores específicos del tipo de macizo:	22
4.1.2. Factores comunes:	30
4.2.3. Indicadores en el terreno y en infraestructuras:	31
5. Diseño e implementación del sistema difuso	33
6. Resultados y discusión	36
6.1. Datos de campo para los casos de estudio.	36
6.2. Resultados del ISTV por el sistema difuso.	43
6.3. Validación.	45
7. Conclusiones	47
8. Líneas de trabajo futuro	48
9. Bibliografía	49
10. Anexos	51
Anexo 1: Relación de variables y reglas lingüísticas para el sistema de conjuntos difusos.	51

1. Introducción

La estabilidad de laderas y taludes es uno de los principales problemas en el ámbito de la Ingeniería Geológica en España, que ha sido ampliamente tratado en el territorio continental, donde dominan los materiales de origen sedimentario, metamórfico e ígneo (plutónico), pero en los que escasean los volcánicos, que aparecen solo de forma testimonial en algunas zonas. Por su parte, en los territorios insulares atlánticos, dominan los materiales volcánicos masivamente (Wilson, (1973); Schmincke, (2010)). Los terrenos volcánicos presentan una serie de características que hacen que sea necesario establecer una diferenciación con respecto al resto de terrenos a la hora de estudiarlos y de actuar sobre ellos (Hernández Gutiérrez, (2014)).

En este trabajo se pretende elaborar una herramienta que, teniendo en cuenta las propiedades de estos materiales, permita evaluar la estabilidad de taludes y laderas en terrenos volcánicos, y realizar una ponderación de la susceptibilidad que tengan a la inestabilidad. Para ello se diseñará un sistema de conjuntos difusos que recoja las incertidumbres y subjetividades que se presentan a la hora de realizar esta evaluación.

1.1. Antecedentes

Este estudio se enmarca dentro del Proyecto MACASTAB: “Bases para la elaboración de una guía metodológica para la gestión del riesgo natural de inestabilidad de laderas y taludes de naturaleza volcánica en la Macaronesia”. MACASTAB es un proyecto de colaboración entre los archipiélagos de la Macaronesia, Cabo Verde, Azores, Madeira y Canarias, cofinanciado con fondos FEDER, y dirigido por el Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción de la Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias y trabaja por dar soluciones adaptadas a estos terrenos volcánicos en cuanto a la estabilidad de laderas y taludes.

El principal objetivo del proyecto MACASTAB es tratar de reducir los riesgos por desprendimientos y deslizamientos en los archipiélagos macaronésicos y optimizar los costes de las soluciones adaptándolas a cada acontecimiento. Los desprendimientos y deslizamientos provocan anualmente grandes pérdidas económicas a las Administraciones, así como accidentes que pueden incluso provocar la pérdida de vidas humanas. Estos eventos afectan a carreteras y otras infraestructuras, espacios protegidos, senderos, playas, etc. Por lo que es clara su influencia en la población y en el turismo de la zona.

Entre los estudios que se han realizado hasta el momento está la definición de los factores condicionantes de la estabilidad de laderas y los desencadenantes de inestabilidades de las mismas. Como desencadenante de inestabilidades destacan las precipitaciones, máxime en islas de relieve muy abrupto como es el caso Tenerife, a este respecto, en colaboración con el Cabildo de Tenerife, el proyecto MACASTAB ha llevado a cabo un estudio que relaciona las precipitaciones con los desprendimientos, encontrando una evidente correlación entre ellos.

En este trabajo, se estudiarán los factores condicionantes de la estabilidad de laderas que son intrínsecos de la misma, sin tener en cuenta la influencia que las lluvias puedan tener sobre los taludes estudiados.

1.2. Objetivos

La estabilidad de taludes y laderas en medios volcánicos precisa de un análisis desde un punto de vista diferente a los que se utilizan en otros tipos de terreno. Para ello este proyecto pretende ofrecer una herramienta diseñada mediante un sistema de conjuntos difusos que permita establecer una ponderación del grado de susceptibilidad para este tipo de taludes.

Se plantean como objetivos de este Trabajo Fin de Máster los siguientes:

- Establecer los factores mínimamente necesarios para la definición de los tipos de taludes más frecuentes en terrenos volcánicos.
- Diseñar un modelo para determinar el grado de susceptibilidad de taludes en terrenos volcánicos: ISTV.
- Validar la salida del sistema borroso comparando los resultados obtenidos con la opinión de profesionales.
- Obtener una relación ordenada de los taludes que se plantean según la susceptibilidad que presenten a las inestabilidades.

1.3. Hipótesis

En problemas de estabilidad de taludes, la incertidumbre de las características mecánicas se prestan a la subjetividad de quien lo analiza. Este problema se agrava en el caso de los taludes en materiales volcánicos. La lógica difusa permite modelar la visión y perspectiva de un experto abarcando ampliamente las interpretaciones que se puedan hacer de un mismo parámetro, de manera que ofrece un análisis más adecuado.

En este trabajo se pretende comprobar la idoneidad de la lógica difusa para cálculo del ISTV, así como que la metodología del ISTV permite que cualquier usuario realice la toma de datos y valore el estado de un talud tal y como lo haría un experto en la materia.

2. Estudios previos

En los estudios de estabilidad de laderas y taludes se utilizan clasificaciones geomecánicas e índices que permiten calcular a partir de una serie de parámetros un índice de calidad del macizo. Entre las más frecuentes y recogidas en la literatura se encuentran: el RMR, el índice Q, el SMR o el GSI. El *Rock Mass Rating System, RMR* (Bieniaswki, 1973, y posterior modificación de 1989) permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y de excavación y sostenimiento en túneles, la incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico del macizo se expresa por medio del índice RMR, rock mass rating, que varía de 0 a 100. (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002). El *Índice Q* fue desarrollado por Bartos, Lien y Lunde en 1974, y permite establecer sistemas de sostenimientos para túneles y cavernas, es un sistema basado en una evolución numérica de seis parámetros que definen el índice Q. (Ferrer. M et al, 2007). Por otro lado, el *SMR* ("Slope Mass Rating") de Romana (1985, 1993, 1995), es un método para determinar los factores de corrección adecuados para aplicar la clasificación RMR de Bieniawski a taludes; proporciona una división en clases de estabilidad y recomendaciones para métodos de soporte y/o corrección (Montalar, Romana, & Serón, 2001). Por último, el *Índice Geológico de Resistencia, GSI* (Hoek, 1994), evalúa la calidad del macizo en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de bloque y alteración de las discontinuidades. (González de Vallejo et al, 2002)

Por otra parte, los modelos difusos han sido utilizados en el campo de la construcción para predecir la vida útil de la edificación patrimonial, por ejemplo, en Macías Bernal, et al (2014), donde aplican la lógica difusa para determinar y valorar los factores

que inciden sobre la vulnerabilidad y riesgos que afectan a los edificios y así calcular su vida útil, también se han utilizado para el cálculo de dosificaciones de morteros de cemento, en Gutiérrez-García, et al, 2017, en el que la aplicación de la lógica borrosa permite conocer la dosificación de los morteros a confeccionar sabiendo de antemano las características finales de los mismos. Cabe resaltar los trabajos de Daftaribesheli, Ataei, & Sereshki, 2011 sobre la aplicación de la lógica difusa al SMR y Park, Um, Woo, & Kim, 2012 en el que se aplica la lógica borrosa para evaluar la probabilidad de fallo en taludes rocosos, en ambos trabajos se hace referencia a la idoneidad de los conjuntos difusos para el análisis de elementos que presentan ambigüedades a la hora de evaluarlos.

3. Marco teórico.

3.1. Unidades geotécnicas y clasificaciones características de terrenos volcánicos.

En los terrenos volcánicos de las islas Canarias, las inestabilidades más frecuentes son los desprendimientos, que afectan a los macizos rocosos y se producen de manera rápida y espontánea, a diferencia de los deslizamientos, en los que se produce una movilización de una masa de suelo o de roca normalmente lenta. Por este motivo, los desprendimientos son más impredecibles que los deslizamientos.

Dentro de los materiales volcánicos encontramos varias litologías que presentan distintas características (Hernández-Gutiérrez, 2014), cada litología tiene sus propiedades geotécnicas, tipo de rotura y movimiento, por esta razón, en base a la experiencia y al historial de movimientos de laderas en Canarias, se han clasificado en tres tipos los taludes que se estudiarán en este trabajo.

Es necesario mencionar que el presente estudio no es aplicable a taludes con pendiente menor de 25° (poco frecuentes en Canarias), o taludes formados por suelos o rocas muy meteorizadas. Tampoco es aplicable a laderas o taludes formados por derrubios o materiales sueltos.

La tabla 3.1 recoge las Unidades Geotécnicas más características en materiales volcánicos. Se distinguen 9 unidades geotécnicas para la Macaronesia (Hernández, 2018),

dentro de las cuales se distinguen dos subunidades para coladas basálticas sanas y ocho para materiales piroclásticos.

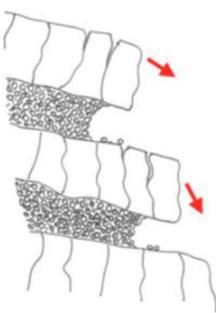
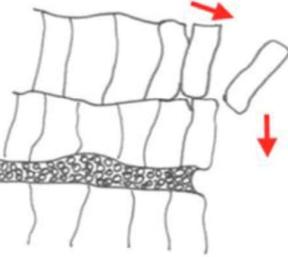
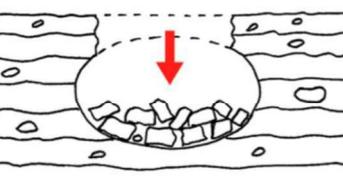
Tabla 3.1. Unidades geotécnicas de la Macaronesia (Hernández, 2018)

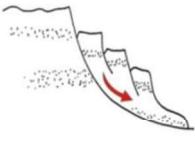
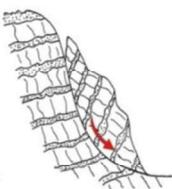
Unidad Geotécnica	Subunidad
Unidad I: Complejos basales	
Unidad II: Coladas y macizos sálicos masivos	
Unidad III: Coladas basálticas alteradas	
Unidad IV: Coladas basálticas sanas	IVa: Muy escoriáceas y/o pahoe-hoe
	IVb: Masivas o poco escoariáceas
Unidad V: Materiales piroclásticos	Va: Ignimbrita soldada
	Vb: Tobas surtseyanas
	Vc: Aglomerados de naturaleza pumítica
	Vd: Aglomerados de naturaleza basáltica
	Ve: Aglomerados brechoideos
	Vf: Depósitos piroclásticos pumíticos sueltos
	Vg: Depósitos piroclásticos basálticos sueltos
	Vh: Ignimbritas no soldadas
Unidad VI: Depósitos aluvio-coluviareos	
Unidad VII: Arenas litorales	
Unidad VIII: Suelos arcillosos y limosos	
Unidad IX: Suelos superficiales / vegetales	
Unidad X: Caliches	
Unidad XI: Rellenos antrópicos	

La tabla 3.2 muestra la clasificación de los tipos de movimiento característicos de los taludes estudiados en este trabajo. La descripción del movimiento se divide en cuatro tipos:

- a) Caída de bloques y chineos, que considera desprendimientos de bloques de tamaño decimétrico a métrico por erosión de la matriz (bloques) y caída de partículas de tamaño centimétrico a milimétrico (chineo).
- b) Caídas por descalces, debidas a la erosión de los niveles piroclásticos o de niveles escoriáceos de coladas basálticas "aa", que provocan caída de prismas rocosos.
- c) Vuelco de prismas rocosos aislados por diaclasado de retracción.
- d) Colapso de tubos o cavidades formadas en el seno de lavas "pahoehoe".
- e) Movimientos en masa con deslizamientos rotacionales, donde las discontinuidades no constituyen superficies de debilidad preferentes.

Tabla 3.2. Clasificación de inestabilidades de laderas y taludes en terrenos volcánicos, Hernández et al. (2015).

Tipo de inestabilidad	Descripción del movimiento	Unidad geotécnica	Observaciones
Desprendimientos	<p>Caída de bloques y "chineos"</p> 	<p>I Vb Vc Vd Ve Vf Vg VI</p>	<p>·Desprendimientos de bloques de tamaño decimétrico a métrico por erosión de la matriz. ·Caída de partículas de tamaño centimétrico a milimétrico (Chineo).</p>
	<p>Caídas por descalces</p> 	<p>IVa IVb V Vh X</p>	<p>·Erosión de los niveles piroclásticos o de niveles escoriáceos de coladas basálticas "aa", que provocan caída por descalce de prismas rocosos.</p>
	<p>Vuelcos</p> 	<p>II III IVa IVb</p>	<p>·Vuelco de prismas rocosos aislados por diaclasado de retracción.</p>
	<p>Colapsos</p> 	<p>IVa</p>	<p>·Colapso de tubos o cavidades formadas en el seno de lavas "pahoehoe".</p>

Deslizamientos rotacionales	Suelos	Rocas	I	· Son más frecuentes en suelos cohesivos.
			II	
			III	
			IV	· También en macizos rocosos blandos o con alto grado de fracturación o alteración, donde las discontinuidades no constituyen superficies de debilidad preferentes.
			V	
			VI	
			VIII	
			IX	

3.2. Lógica difusa

“Un conjunto difuso es una clase de objetos con un continuo de grados de pertenencia. Cada conjunto se caracteriza por una función de pertenencia que asigna a cada objeto un grado de pertenencia que varía entre cero y uno”. (Zadeh, 1965).

A diferencia de la lógica clásica, la lógica difusa o borrosa admite que un elemento pertenezca a varios conjuntos, es decir, un coche puede ir rápido o no dependiendo del concepto de rapidez que tenga el observador; lo que para algunos puede ser muy rápido para otros es normal o simplemente rápido y habrá quien lo considere lento. La teoría de conjuntos difusos se presenta más adecuada que la lógica clásica para representar el conocimiento humano, ya que permite que los fenómenos y observaciones tengan más de dos estados lógicos. Esta teoría no es probabilista, sino que se basa en las llamadas *funciones de pertenencia*, que gradúan la pertenencia de los elementos a los conjuntos (Gutiérrez-García et al, 2017). En esta teoría, un elemento puede pertenecer a varios conjuntos difusos al mismo tiempo, pero con distintos grados de pertenencia.

Para modelar un sistema real con la lógica borrosa, es necesario definir las variables características del sistema como *variables lingüísticas*. Los posibles valores de una variable lingüística son las *etiquetas lingüísticas*. Por ejemplo, en el sistema que se ha diseñado para este trabajo, la “fracturación del macizo” es una variable lingüística, cuyos posibles valores vienen definidos por las siguientes etiquetas lingüísticas: “masivo”, “poco fracturado”, “moderadamente fracturado” y “muy fracturado”. Cada etiqueta se corresponde a un conjunto borroso, y matemáticamente se representa con una función de pertenencia.

Estas funciones de pertenencia pueden tener diferentes formas, en el ejemplo de la figura 3.1 se muestran funciones de pertenencia con forma de campana gaussiana. Como se puede observar en la citada figura, las funciones de pertenencia se colocan de manera que proporcionen una transición gradual entre estados.

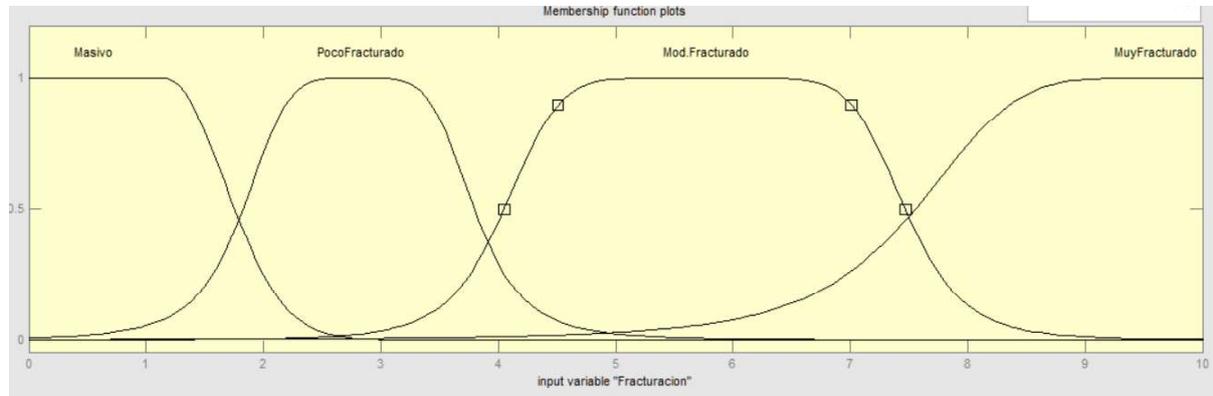


Figura 3.1. Captura de las etiquetas de la variable lingüística Fracturación del macizo y la distribución de sus etiquetas. (Captura del sistema diseñado con la Dra. Silvia Alayón).

El cálculo del sistema se realiza a partir de las reglas difusas. Una regla difusa o borrosa es una relación del tipo “si-entonces” que tiene la siguiente forma: “Si x es A entonces y es B ”, donde A y B son etiquetas lingüísticas de las variables lingüísticas x e y . El término “ x es A ” se denomina *antecedente*, mientras que el término “ y es B ” se denomina *consecuente* (Gutiérrez-García et al, 2017). Un ejemplo podrá ser: “Si *la fracturación es alta*, entonces el *talud es inestable*”.

Un Sistema Basado en Reglas Borrosas (SBRB) es un conjunto de reglas borrosas que modela el comportamiento de un sistema real mediante las relaciones entre las variables lingüísticas que establecen sus reglas. Una vez que el SBRB está diseñado, el razonamiento difuso o borroso se lleva a cabo en las tres etapas que se muestran en la figura 3.3 (Daftaribesheli et al, 2011):

- La primera etapa es la *etapa de borrosificación* (en inglés, *fuzzyfication*). En esta etapa se convierten los datos de entrada reales en conjuntos borrosos que pueden ser introducidos como entradas al sistema borroso.

- La segunda etapa es la etapa de *inferencia borrosa*. La inferencia borrosa es el proceso mediante el cual se extraen conclusiones del sistema borroso (una salida borrosa) a partir de la interacción entre las entradas al sistema y las reglas del mismo. El razonamiento humano se basa en la regla de inferencia clásica *Modus Poens* que permite

inferir la verdad de la proposición B (“El talud es inestable”), a partir de la verdad de la proposición A (“la fracturación es alta”) y de la implicación $A \rightarrow B$ (“Si la fracturación es alta, entonces el talud es inestable”). Sin embargo, es frecuente utilizar el *modus poens* de forma aproximada. Por ejemplo, si para una misma regla de implicación $A \rightarrow B$ (“si la fracturación es alta, entonces el talud es inestable”) se sabe que “la fracturación es más o menos alta” (x es A’), entonces podemos inferir que “el talud es más o menos estable” (y es B’), A’ es “más o menos” A y B’ es “más o menos” B. Este tipo de razonamiento es el razonamiento borroso o difuso, en el que A, B, A’ y B’ son conjuntos borrosos del universo del discurso correspondiente. Esta regla de inferencia también es conocida como el *Modus Poens Generalizado (GMP)*. Existen diferentes modos de determinar esta interacción, y en este trabajo se ha utilizado el algoritmo de Mamdani (Mamdani, 1974); tal y como muestra la figura 3.2, para cada regla del sistema borroso, se analiza cada antecedente y se calcula la intersección entre los conjuntos borrosos del antecedente de la regla y del hecho, es decir: $\mu_A(x) \cap \mu_{A'}(x)$, $\mu_B(x) \cap \mu_{B'}(x)$... El algoritmo de Mamdani toma el valor mínimo de cada antecedente y lo utiliza para activar la parte proporcional del conjunto borroso que representa el consecuente. Una vez obtenidas las partes activadas de los consecuentes de cada regla, se calcula la salida del sistema como la unión de todas las partes activadas (conjunto borroso C’ en la figura 3.2) (Gutiérrez-García et al, 2017).

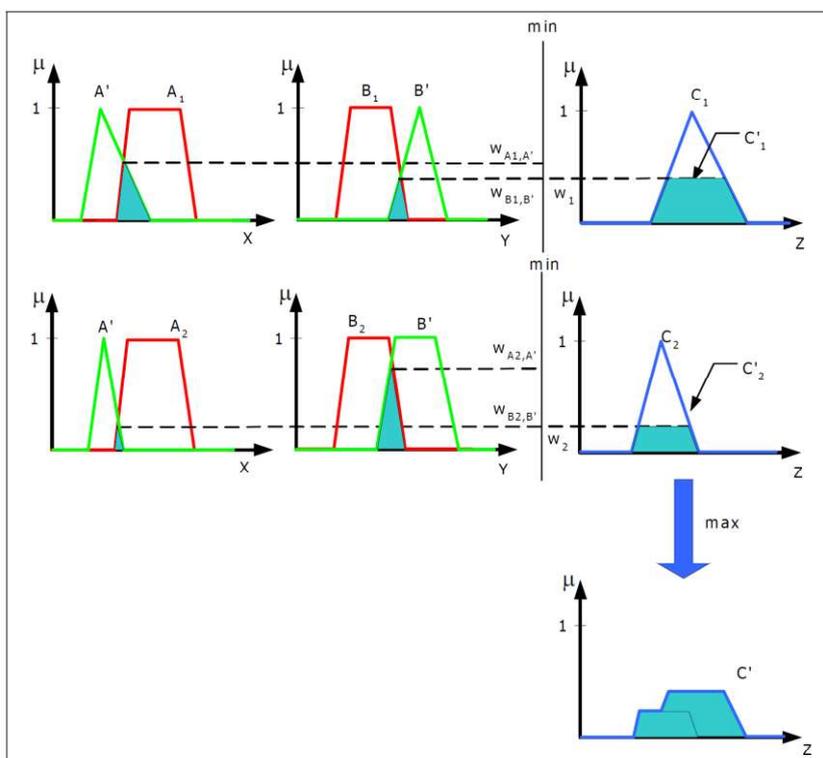


Figura 3.2. Interpretación gráfica del Modus Ponens Generalizado en un sistema con dos reglas, cada una con múltiples antecedentes, utilizando el implicador borroso de Mamdani (mínimo) y el operador composicional max-min (Gutiérrez-García et al, 2017).

-La tercera y última etapa es la *etapa de desborrosificación* (en inglés, *defuzzification*). En esta etapa se realiza la conversión del conjunto difuso de salida en un valor numérico. Existen varios métodos de desborrosificación, en este trabajo se ha utilizado el método del centroide del área del conjunto difuso de salida.

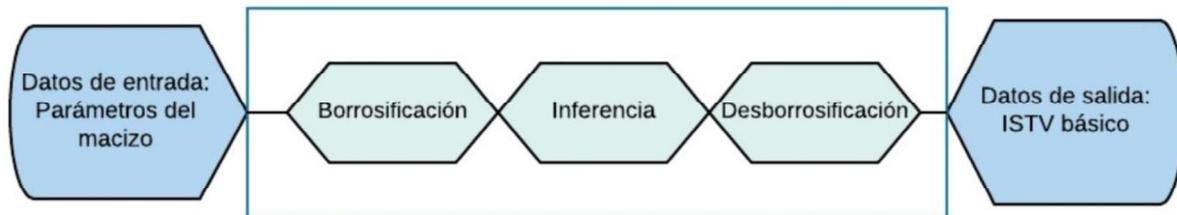


Figura 3.3. Esquema de funcionamiento del sistema difuso. Fuente: Adaptado de Daftaribesheli, Ataei, & Sereshki, 2011.

4. Metodología ISTV

El Índice de Susceptibilidad de Taludes en terrenos Volcánicos (ISTV) es una herramienta que permite clasificar los taludes volcánicos atendiendo a su grado de susceptibilidad a la generación de inestabilidades. La susceptibilidad se define en este caso como la posibilidad de que se produzca una inestabilidad, en este trabajo no se valora la probabilidad de ocurrencia. Dado que este es un análisis subjetivo, se podría expresar como la percepción que tiene el técnico que aplique el sistema sobre la inestabilidad del talud.

De la aplicación de este índice se obtienen dos valores: el denominado ISTV básico, obtenido por medio del sistema de conjuntos borrosos que se ha diseñado (ver apartado 5) y el ISTV corregido, que multiplica el ISTV básico por un *factor "i"* que se define en función del número de indicadores que se identifiquen en el terreno o infraestructuras y construcciones que puedan estar afectadas por el talud.

En la figura 4.1 se presenta un diagrama de flujo en el que se muestran los pasos a seguir para el cálculo del ISTV:

-Primero: Elección del tipo de macizo. Se definen tres tipos de macizos que engloban las características de los taludes volcánicos:

- Macizo tipo A: Contempla los taludes formados únicamente por niveles o paquetes de rocas duras como son las que se forman a partir del

enfriamiento de coladas basálticas y sálicas y de los depósitos piroclásticos compactos, como pueden ser tobas o ignimbritas soldadas.

- Macizo B: Abarca los taludes formados por materiales piroclásticos de caída, de naturaleza basáltica y sálica, en los que sus partículas están poco o nada soldadas y que presentan características de roca blanda o suelo duro.
- Macizos tipo C: Son aquellos en los que se produce una alternancia de materiales de distinta competencia (duro, blando) o erosión diferencial entre capas de materiales similares.

-Segundo: Una vez se ha reconocido el tipo de macizo que se va a estudiar habrá que valorar los factores específicos (apartado 4.1.1) .

-Tercero: Valoración de los factores comunes (apartado 4.1.2), como son la pendiente y la cercanía al mar.

-Cuarto: Introducir los valores obtenidos de cada uno de los parámetros en el sistema difuso mediante las reglas lingüísticas diseñadas y se obtendrá el ISTV básico.

-Quinto: Realizar el cálculo del ISTV corregido, para lo que será necesario observar la existencia de alguno de los indicadores presentados en el apartado 4.1.3 de este trabajo y multiplicar el ISTV básico por el *índice i* obtenido a partir del número de indicadores presentes:

$$ISTV_{\text{corregido}} = ISTV_{\text{básico}} \cdot i \quad (4.2)$$

El resultado del ISTV, ya sea básico o corregido, será una puntuación de 0 a 100 que permitirá clasificarlos, según el grado de susceptibilidad a las inestabilidades, en: bajo, moderado, alto o muy alto como se muestra en la tabla 4.1:

Tabla 4.1. Valores del ISTV.

Grado	Puntuación ISTV	Susceptibilidad
1	< 30	Baja
2	> 30 ≤ 55	Moderada
3	> 55 ≤ 80	Alta
4	> 80	Muy Alta

En relación a los valores obtenidos con el ISTV, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Un resultado de susceptibilidad muy alta no implica que el talud vaya a sufrir una inestabilidad de manera inminente ni que sea completamente estable en caso de susceptibilidad baja. El ISTV ofrece la posibilidad de establecer una relación ordenada que ayuda a priorizar la realización de estudios pormenorizados posteriores que se estimen necesarios.
- El resultado obtenido en el ISTV tampoco es permanente. Los taludes y laderas son elementos dinámicos que están en constante cambio, por lo que la clasificación que se obtenga deberá ser actualizada cada cierto tiempo.

La figura 4.2. muestra la ficha de toma de datos diseñada, en la que se puede marcar el tipo de talud y las características en cada caso, así como ponderar cada factor con el fin de reflejar lo observado en el terreno y evitar que la percepción cambie a la hora de introducir los datos en el sistema borroso.

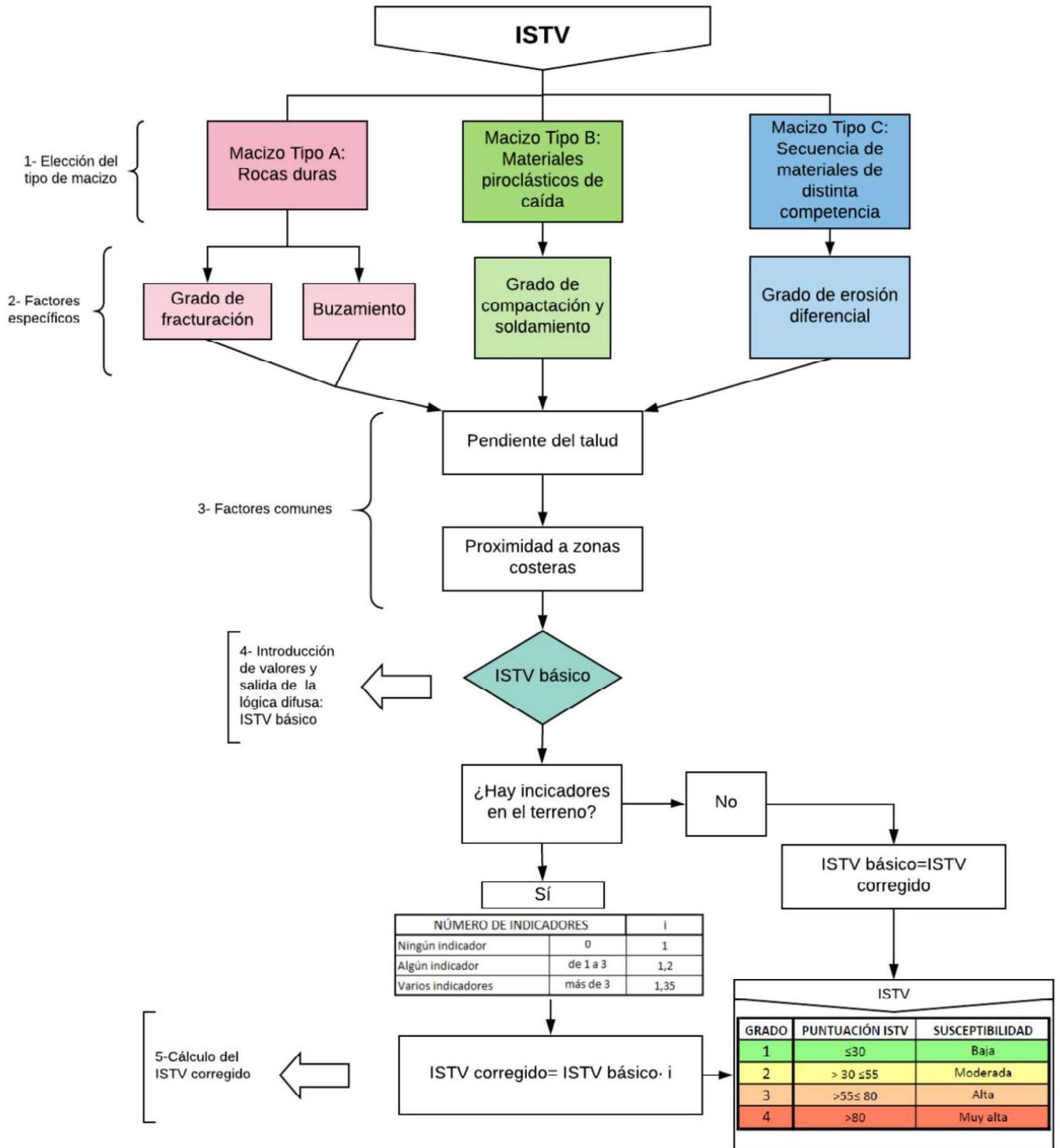


Figura 4.1. Diagrama de flujo. Fuente: Elaboración propia.

ID Talud:	Ubicación:	Materiales del talud:																																		
Coordenadas:	Fecha:																																			
INDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DE INESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCAS VOLCÁNICAS (ISTV)																																				
MACIZOS TIPO A: ROCAS DURAS	MACIZOS TIPO B: MATERIALES PIROCLÁSTICOS DE CAÍDA	MACIZOS TIPO C: SECUENCIA DE MATERIALES DE DISTINTA COMPETENCIA																																		
A.1. Grado de fracturación	B1. Grado de compactación/soldamiento	C.1. Grado de erosión diferencial																																		
<ul style="list-style-type: none"> · Masivo (0-2) <input type="text"/> · Poco fracturado (2-4) <input type="text"/> · Moderadamente fracturado (4-7) <input type="text"/> · Muy fracturado (7-10) <input type="text"/> 	<ul style="list-style-type: none"> · Muy bajo (0-3) <input type="text"/> · Bajo (3-7,5) <input type="text"/> · Medio (7,5-10) <input type="text"/> 	<ul style="list-style-type: none"> · Medio (0-2,5) <input type="text"/> · Alto (2,5-7,5) <input type="text"/> · Formación de cornisas (7,5-10) <input type="text"/> 																																		
A.2. Buzamiento :																																				
<ul style="list-style-type: none"> · <=40° (0-5) <input type="text"/> · >40 (5-10) <input type="text"/> 																																				
P. PENDIENTE DEL TALUD																																				
<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="3">Pendiente predominante</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">25° - 44°</td> <td style="text-align: center;">Alta</td> <td style="text-align: center;">(0-3) <input type="text"/></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">45° - 75°</td> <td style="text-align: center;">Muy alta</td> <td style="text-align: center;">(3-7) <input type="text"/></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">>75°</td> <td style="text-align: center;">Subvertical</td> <td style="text-align: center;">(7-10) <input type="text"/></td> </tr> </table>			Pendiente predominante			25° - 44°	Alta	(0-3) <input type="text"/>	45° - 75°	Muy alta	(3-7) <input type="text"/>	>75°	Subvertical	(7-10) <input type="text"/>																						
Pendiente predominante																																				
25° - 44°	Alta	(0-3) <input type="text"/>																																		
45° - 75°	Muy alta	(3-7) <input type="text"/>																																		
>75°	Subvertical	(7-10) <input type="text"/>																																		
Z. ZONAS COSTERAS																																				
<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;">Taludes acantilados a menos de 50 m de la pleamar (5-10) <input type="text"/></td> </tr> </table>			Taludes acantilados a menos de 50 m de la pleamar (5-10) <input type="text"/>																																	
Taludes acantilados a menos de 50 m de la pleamar (5-10) <input type="text"/>																																				
i. INDICADORES EN EL TERRENO Y EN INFRAESTRUCTURAS																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Grietas y escarpes.</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Abombamientos y deformaciones.</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Caída de rocas y tierras.</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Desvío de cauces.</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Acumulación de depósitos a pie de ladera.</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Encharcamientos.</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Cambios en fuentes y en sugerencias de agua</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Inclinación de árboles.</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Grietas en muros, cimentaciones y elementos estructurales.</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Inclinación y desplomes de muros.</td><td><input type="text"/></td></tr> <tr><td>Roturas en conducciones.</td><td><input type="text"/></td></tr> </table>		Grietas y escarpes.	<input type="text"/>	Abombamientos y deformaciones.	<input type="text"/>	Caída de rocas y tierras.	<input type="text"/>	Desvío de cauces.	<input type="text"/>	Acumulación de depósitos a pie de ladera.	<input type="text"/>	Encharcamientos.	<input type="text"/>	Cambios en fuentes y en sugerencias de agua	<input type="text"/>	Inclinación de árboles.	<input type="text"/>	Grietas en muros, cimentaciones y elementos estructurales.	<input type="text"/>	Inclinación y desplomes de muros.	<input type="text"/>	Roturas en conducciones.	<input type="text"/>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="3">NÚMERO DE INDICADORES</th> </tr> <tr> <td>Ningún indicador</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td>Algún indicador</td> <td style="text-align: center;">de 1 a 3</td> <td style="text-align: center;">1,2</td> </tr> <tr> <td>Varios indicadores</td> <td style="text-align: center;">más de 3</td> <td style="text-align: center;">1,35</td> </tr> </table>	NÚMERO DE INDICADORES			Ningún indicador	0	1	Algún indicador	de 1 a 3	1,2	Varios indicadores	más de 3	1,35
Grietas y escarpes.	<input type="text"/>																																			
Abombamientos y deformaciones.	<input type="text"/>																																			
Caída de rocas y tierras.	<input type="text"/>																																			
Desvío de cauces.	<input type="text"/>																																			
Acumulación de depósitos a pie de ladera.	<input type="text"/>																																			
Encharcamientos.	<input type="text"/>																																			
Cambios en fuentes y en sugerencias de agua	<input type="text"/>																																			
Inclinación de árboles.	<input type="text"/>																																			
Grietas en muros, cimentaciones y elementos estructurales.	<input type="text"/>																																			
Inclinación y desplomes de muros.	<input type="text"/>																																			
Roturas en conducciones.	<input type="text"/>																																			
NÚMERO DE INDICADORES																																				
Ningún indicador	0	1																																		
Algún indicador	de 1 a 3	1,2																																		
Varios indicadores	más de 3	1,35																																		

Figura 4.2. Ficha de obtención de datos para el campo. Fuente: Elaboración propia.

Se realizó una validación preliminar mediante un cuestionario anónimo (Figura 4.3) que presentaba imágenes de 6 macizos donde se debía indicar el grado de susceptibilidad por simple apreciación visual, así como ordenarlos según la peligrosidad que observara cada encuestado. El cuestionario fue respondido por 12 titulados con conocimientos en geología y geotecnia de los cuales solo 10 contestaron a la pregunta de ordenar los taludes.

PREGUNTAS RESPUESTAS 12

Susceptibilidad a la inestabilidad de taludes

En este cuestionario se pide una valoración de la posibilidad de que en los taludes que se muestran se produzca una inestabilidad.

Para ello, se deberá tener en cuenta que la estabilidad de un talud depende de una serie de factores:

- Grado de fracturación
- Suavamiento (inclinación) de las discontinuidades.
- Compactación o soldamiento en el caso de materiales piroclásticos.
- Presencia de erosión diferencial y cavidades.
- Pendiente del talud.

Teniendo en cuenta estos factores se pide que se exprese el grado de susceptibilidad a las inestabilidades de 6 taludes, a partir de imágenes. Puesto que con una imagen no es posible apreciar todos los factores ni valorarlos, se pide que teniendo los en cuenta, se conteste en función de la apreciación visual:

- Baja, si cree que el talud es estable.
- Moderada si existe algún elemento que le haga pensar que puede ocurrir un desprendimiento o inestabilidad.
- Alta, si considera que la posibilidad de que se produzcan desprendimientos o inestabilidades es alta.
- Muy alta, si cree que el talud es inestable.

Talud 1. EL Mirador: Talud de coladas basálticas de gran competencia situado en la carretera a la altura de la Gasolinera El Mirador de San Juan de la Rambla. Talud de coladas basálticas de gran competencia situado en la carretera a la altura de la Gasolinera El Mirador de San Juan de la Rambla.



- Susceptibilidad Baja
- Susceptibilidad Moderada
- Susceptibilidad Alta
- Susceptibilidad Muy Alta

Talud 3: Este talud se encuentra en la incorporación a la TF-1 en la Montaña del Socorro, Güímar. Se trata de un talud de piroclastos de caída con una compactación baja, pero no suelta.



- Susceptibilidad Baja
- Susceptibilidad Moderada
- Susceptibilidad Alta
- Susceptibilidad Muy Alta

Talud 4: Talud en la carretera TF-620, compuesto por ignimbritas no soldadas y pómez de caída.



- Susceptibilidad Baja
- Susceptibilidad Moderada
- Susceptibilidad Alta
- Susceptibilidad Muy Alta

Figura 4.3. Captura de fragmentos de la encuesta realizada. Fuente: Elaboración propia.

Para una correcta validación del ISTV, sería conveniente realizar una encuesta parecida, a expertos en la materia, con experiencia en el sector. De esta manera se podría conocer la idoneidad del método y calibrarlo en función de la opinión de un grupo amplio de expertos.

4.1. Definición de los parámetros del ISTV

Para aplicar de manera correcta el ISTV es necesario conocer los parámetros que se tienen en cuenta a la hora de definir la susceptibilidad de un talud en terreno volcánico a ser inestable.

En este apartado se define cada uno de los parámetros y se describe la toma de datos utilizada, que ha sido adaptada a las necesidades y capacidades del estudio que se está realizando, de manera que no sea necesario un instrumental específico y se pueda realizar rápidamente con la sencillez y la precisión que requiere un estudio preliminar de este tipo.

Los datos que son necesarios introducir en el sistema difuso se han normalizado en un rango entre 1 y 10, siendo 1 la puntuación menos desfavorable y 10 la más desfavorable. Por ejemplo, un talud con poca pendiente del 30%, se introducirá en la lógica difusa con una puntuación de aproximadamente 2 ó 3, mientras que un talud completamente vertical se valoraría con un 10. Tanto en las tablas descritas en este apartado como en la ficha de campo (Figura 4.2), se indica la normalización para cada parámetro, ajustados al criterio de los expertos consultados para el diseño del sistema difuso. Los factores se han clasificado en tres grupos: los específicos para cada tipo de macizo, los factores comunes, que son aplicables a los tres tipos, y por último los indicadores en el terreno y en las infraestructuras.

4.1.1. Factores específicos del tipo de macizo:

En base a las unidades geotécnicas y sus características, así como al tipo de problemática que puedan presentar, se ha realizado una clasificación de los tipos de taludes en tipo A, B o C. Cada tipo de macizo tiene unas características propias y unos parámetros a observar propios del material o materiales que lo forman y la manera en que se desencadenan las inestabilidades en cada caso. A continuación se describe cada tipo y los factores asociados a cada uno de ellos:

- **Taludes tipo A:** serán aquellos en los que predominen las rocas duras: coladas basálticas y sálicas (traquitas, fonolitas y riolitas) o piroclastos compactos como pueden ser tobos o ignimbritas soldadas, la figura 4.4 muestra dos ejemplos de taludes tipo A. Como inestabilidades más frecuentes, estos taludes presentan

desprendimientos por vuelco o caídas de bloques y chineo, y su principal problema, o causa de la inestabilidad, es la fracturación y diaclasado.



Figura 4.4. Ejemplos de macizos tipo A. A la izquierda macizo basáltico y a la derecha talud en piroclastos sálicos. (Fotos: Ana Miranda).

-Fracturación del macizo: este parámetro se estudia para los taludes tipo A, formados por rocas duras. La fracturación del macizo rocoso está ligada al número y condiciones de las fracturas que afectan a los materiales geológicos que forman el macizo. Muchas de estas discontinuidades a las que llamamos fracturas no lo son, sino que se trata de diaclasado de retracción, una característica común a la mayoría de rocas volcánicas que se forman a partir del enfriamiento de un fundido (lava). A fin de simplificar, se adopta en esta clasificación el término fracturación para todas las discontinuidades planares que afectan al macizo rocoso. La descripción de la fracturación puede efectuarse refiriéndose al número de familias y al tamaño de bloque, a partir de la intensidad de fracturación, referida al espaciado o separación entre discontinuidades, o mediante el RQD en testigos de sondeos (Ferrer. M et al 2007 y González de Vallejo, L. et al (2010)).

Para el ISTV, la descripción de la fracturación del talud se realizará siguiendo el procedimiento del parámetro J_v , que contabiliza el número de discontinuidades en un metro cúbico del talud. Dado que un metro cúbico implica estimar tridimensionalmente las discontinuidades o fracturas, se puede determinar el J_v por el número de discontinuidades en una unidad de longitud en los casos en que el talud no permita observar ni estimar las discontinuidades en la tercera dimensión. En general, para este trabajo se tomará un metro lineal como unidad de longitud para el ISTV:

$$J_v = \frac{\text{n}^\circ \text{ de discontinuidades}}{\text{Longitud de medida}} \quad (4.1)$$

Así, según el valor de J_v (ver Tabla 4.2), el macizo se definirá como masivo, poco fracturado, moderadamente fracturado o muy fracturado:

Tabla 4.2. Clasificación del macizo según su fracturación y valores a introducir en la lógica difusa.

Nivel de fracturación	J_v (Nº discontinuidades/m ³)	Normalización del rango de valores
Masivo	<1	0-2
Poco fracturado	de 1 a 3	2-4
Moderadamente fracturado	de 3 a 10	4-7
Muy fracturado	>10	7-10

A continuación, se muestran imágenes de taludes con diferentes grados de fracturación, la figura 4.5 presenta dos taludes, a la izquierda se encuentra un talud sin fracturación, constituido por ignimbrita soldada, que se puede definir como masivo, y a la derecha se observa un talud poco fracturado, de naturaleza basáltica, que presenta entre 1 y 3 discontinuidades por metro lineal.

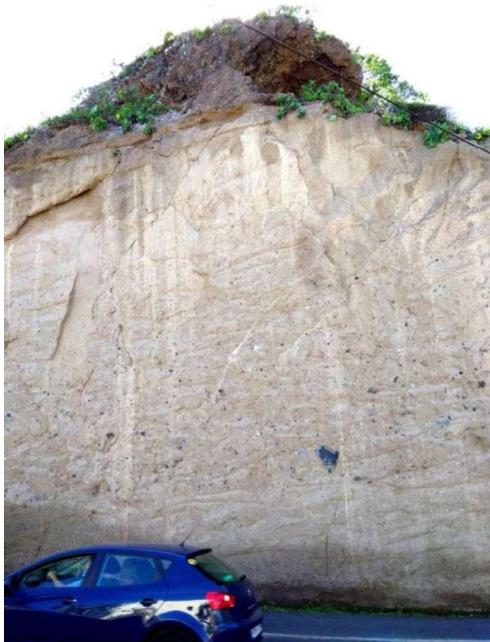


Figura 4.5. Ejemplos de grados de fracturación. A la derecha macizo masivo, a la izquierda poco fracturado.
(Fotos: Ana Miranda).

La figura 4.6 muestra imágenes de taludes con grados de fracturación altos, a la derecha se observa un talud moderadamente fracturado, correspondiente a un macizo traquítico, con más de 3 discontinuidades por metro lineal, mientras que a la izquierda se observa un macizo con un alto grado de fracturación, correspondiente a un dique basáltico, en el que hay discontinuidades en todos los sentidos y sin separación entre ellas.



Figura 4.6. Ejemplos de grados de fracturación. A la derecha macizo moderadamente fracturado, a la izquierda muy fracturado. (Fotos: Ana Miranda).

-Buzamiento/orientación: es el segundo factor a tener en cuenta para los macizos tipo A, y se refiere a la inclinación y orientación de los planos principales de discontinuidad y de la estructura geológica del talud. En Ferrer. M, et al, (2007), se define la orientación de una discontinuidad como la dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al Norte, y por buzamiento la inclinación respecto a la horizontal de dicha línea. Es lo que se denomina dirección de buzamiento y buzamiento, y para su medida se utiliza una brújula con clinómetro o el diaclasímetro.

Para la toma de datos se observará la orientación e inclinación de la estructura general del talud y de los planos que formen las discontinuidades o fracturas más importantes, describiendo si se inclinan a favor de la pendiente y si lo hacen en un ángulo mayor o igual a 40° .

Para estimar la inclinación se puede utilizar una plantilla de ángulos (Figura 4.7) o hacer uso de aplicaciones para móviles que permiten medir la inclinación como se muestra en la figura 4.8. Se tomará la mayor medida observada en el talud a favor de la pendiente.

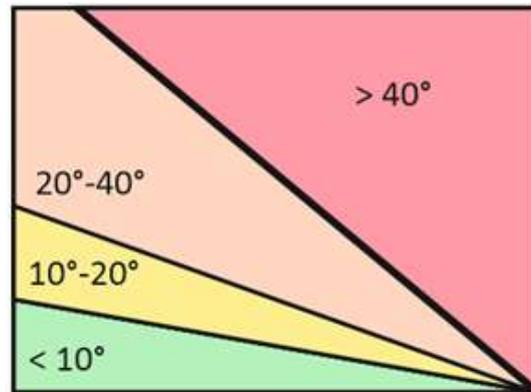


Figura 4.7. Plantilla de ángulos propuesta. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.8. A la izquierda ejemplo de buzamiento de las discontinuidades de un talud, a la derecha ejemplo de medición con aplicaciones móviles. (Fotos: Ana Miranda).

Para la valoración de este parámetro y la introducción de datos en la sistema difuso se puntuará por encima de 5 el buzamiento igual o mayor a 40° y por debajo de 5 en el caso de que el buzamiento de las estructuras o discontinuidades no llegue a los 40° .

- **Taludes tipo B:** Son macizos compuestos por depósitos de materiales piroclásticos tanto basálticos como sálicos, sueltos o débilmente soldados (conocidos como picón o pómez) (Figura 4.9). Los desprendimientos característicos de este tipo de taludes son la caída de bloques y chineo, además de movimientos en masa (deslizamientos rotacionales).



Figura 4.9. Ejemplos de macizos tipo B con distinto grado de soldamiento, a la izquierda con cierto grado de cohesión, y a la derecha piroclastos sueltos (Fotos: Ana Miranda izq. y Luis Hernández dcha.)

-Compactación/soldamiento: se refiere a la cohesión entre las partículas piroclásticas que conforman los macizos tipo B. El hecho de que un talud formado por materiales piroclásticos de caída esté más o menos compactado o soldado influye de manera relevante en su estabilidad, siendo más inestable a medida que disminuye su compactación y soldamiento.

El grado de compactación o soldamiento se obtiene con ayuda de un martillo de geólogo, con el que se deberá tratar de extraer material del talud, y se clasificará según la resistencia del talud al arranque de material con esta herramienta (Figura 4.10) como se detalla en la tabla 4.3:

Tabla 4.3. Clasificación del macizo según su grado de compactación y valores a introducir en la lógica difusa.

Grado de compactación/soldamiento	Descripción	Normalización del rango de valores
Muy bajo	Se arranca fácilmente con la mano	0 - 3
Bajo	Se arranca fácilmente con el martillo	3 - 7,5
Medio	Se arranca con dificultad con el martillo	7,5 - 10

En el caso de este parámetro, la configuración lingüística ha planteado a la inversa del resto de parámetros, siendo 0 la definición más favorable y 10 la más desfavorable, puesto que representa el menor grado de compactación o soldamiento de las partículas.



Figura 4.10. Martillo de geólogo. (Fotos: Ana Miranda).

- **Taludes tipo C:** Macizos formados por secuencias de materiales de distinta competencia, como por ejemplo, alternancias entre niveles de compactos de lavas y niveles de escorias, o de piroclastos que se erosionan a ritmos distintos, la figura 4.11 muestra dos ejemplos de este tipo de taludes. La erosión diferencial provoca que estos taludes sufran la caída de bloques por descalce.



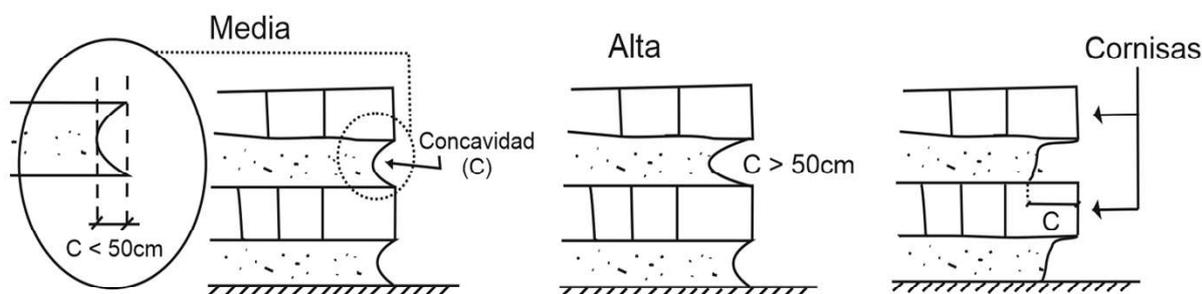
Figura 4.11. Ejemplos de macizos tipo C. A la izquierda se observa la alternancia de materiales y a la derecha formación de cornisas en el talud. (Fotos: Ana Miranda).

-Erosión diferencial: los diferentes materiales que conforman los macizos tipo C tienen características geológicas y resistencias distintas, lo que provoca que las capas se erosionen a distinto ritmo en función de su resistencia a los elementos erosivos. Esta erosión diferencial da lugar a la formación de cavidades o cornisas, que favorecen las inestabilidades. En caso de no encontrar erosión diferencial se observará el material predominante o el que sea más desfavorable para tratar el macizo como tipo A o B según proceda.

El grado de erosión diferencial se clasificará en medio, alto o con formación de cornisas (Tabla 4.4), dependiendo de la socavación máxima que presente la zona erosionada del talud o la formación de cornisas. La figura 4.12 explica gráficamente las diferencias entre los distintos niveles de erosión diferencial.

Tabla 4.4. Clasificación del macizo según su grado de erosión diferencial y valores a introducir en la lógica difusa.

Grado de erosión diferencial	Descripción	Normalización del rango de valores
Medio	Pequeñas concavidades en el material erosionado ($C < 50\text{cm}$)	0 - 2,5
Alto	Concavidades grandes ($C > 50\text{cm}$)	2,5 - 7,5
Formación de cornisas	Rocas en voladizo en el talud	7,5 - 10



C= máxima socavación por erosión en cm.

Figura 4.12. Esquemas de los niveles de erosión diferencial. Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Factores comunes:

Los factores comunes afectan a cualquier tipo de macizo y son: la pendiente del talud, que hay que tenerla en cuenta en todos los casos, y la cercanía al mar, que se valorará sólo en el caso de un talud a menos de 50 metros del mar.

-Pendiente del talud: la inclinación del talud, es decir su pendiente, condiciona la estabilidad general. Para ponderar este factor se indicará si la pendiente del talud está dentro de los siguientes rangos: 25°-44°, 45°-75 o de más de 75° en cuyo caso será un talud con pendiente subvertical como se indica en la tabla 4.5:

Tabla 4.5. Clasificación del macizo según su pendiente y valores a introducir en la lógica difusa

Pendiente del talud	Descripción	Normalización del rango de valores
25°-44°	Alta	0 - 3
45°-75°	Muy alta	3 - 7
>75°	Subvertical	7 - 10

-Proximidad a la costa: Los acantilados costeros y taludes o laderas sometidos a la acción de erosiva del mar sufren una socavación al pie que da lugar a una pérdida de resistencia en esta zona y a la modificación del estado tensional, lo que unido a la falta de apoyo del material suprayacente puede provocar la inestabilidad y la generación de deslizamientos o desprendimientos. Las laderas costeras sometidas a la acción de las mareas y al oleaje son zonas, en general, con riesgo de inestabilidad (Figura 4.13). Merecen destacarse los procesos de erosión en acantilados rocosos, que dan lugar al retroceso de los mismos. La actividad está ligada a los temporales marítimos, especialmente si coinciden con mareas vivas.

Si se trata de un talud en un acantilado costero o taludes o laderas sometidos a la acción de erosiva del mar, se tendrá en cuenta este parámetro, puntuando en el sistema difuso por debajo de 5 en caso de no estar influenciado por la carrera de mareas, y por encima de 5 en el caso de acantilados costeros y taludes sometidos a la acción marina.



Figura 4.13. Acantilado afectado por la erosión marina. (Foto: Ana Miranda).

4.2.3. Indicadores en el terreno y en infraestructuras:

En muchas ocasiones el desencadenamiento de una inestabilidad va precedida de una serie de fenómenos precursores que se reflejan en el terreno o en las estructuras y que pueden indicar un proceso de inestabilidad activo. Los indicadores más frecuentes de inestabilidad observables en las laderas y taludes son:

- Grietas y escarpes.
- Abombamientos y deformaciones.
- Caída de rocas y tierras.
- Desvío de cauces.
- Acumulación de depósitos a pie de ladera.
- Encharcamientos.
- Cambios en fuentes y en sugerencias de agua.
- Inclinación de árboles.

Cuando las deformaciones del terreno inciden en edificaciones e infraestructuras, se puede observar la presencia de las siguientes afectaciones a las mismas:

- Grietas en muros, cimentaciones y elementos estructurales.
- Inclinación y desplomes de muros.
- Roturas en conducciones.

La presencia de estos indicadores debe penalizar el valor de ISTV básico obtenido, por tanto, se toman como factor de corrección que se aplica de manera independiente al sistema de lógica borrosa, multiplicando el valor de salida del sistema por un *índice (i)* en función del número de indicadores que se encuentren en el talud (Tabla 4.6).

Tabla 4.6. Valores del índice *i* para la corrección del valor obtenido en el ISTV.

Número de indicadores		<i>i</i>
Ningún indicador	0	1
Algún indicador	de 1 a 3	1,2
Varios indicadores	más de 3	1,35

5. Diseño e implementación del sistema difuso

El diseño del sistema difuso basado en reglas se realizó con la librería de lógica borrosa del programa MATLAB, versión 7.9.0.529. (Matlab) de 2009, en el departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas de la ULL, con la ayuda de la Doctora Silvia Alayón Miranda, experta en programación de este tipo de sistemas.

El sistema difuso basado en reglas para la determinación del ISTV se dividió en tres subsistemas atendiendo al tipo de macizo del que se trataba (macizo tipo A, B o C), debido a la complejidad que suponía programar un solo sistema que abarcara todas las variables y reglas del ISTV al completo. Esta división permitió simplificar el diseño de las reglas de cada subsistema y la aplicación del mismo. Se llevó a cabo el mismo procedimiento para el diseño de los tres subsistemas, que se explica a continuación utilizando el macizo tipo B como ejemplo:

1. En primer lugar, se identifican los factores que influyen en el comportamiento de este macizo que son: la *compactación*, la *pendiente* y la *cercanía a zonas costeras*, y se representan mediante variables lingüísticas. Para cada una de estas variables se asignan las etiquetas lingüísticas posibles: en el caso de la “compactación” las etiquetas son “media”, “baja” y “muy baja”; para la “pendiente” las etiquetas son “25-44°”, “44-75°” y “más de 75°”; en el caso de la “cercanía a zonas costeras” las etiquetas son “lejos” o “a menos de 50 metros”.

2. Una vez establecidas las variables lingüísticas de entrada y salida del sistema y sus etiquetas lingüísticas, se eligen las funciones de pertenencia que representan matemáticamente a cada etiqueta. En el caso que nos ocupa, las funciones elegidas para representar las etiquetas de la variable “compactación” son funciones gaussianas, ya que permiten modelar las transiciones entre etiquetas de manera más gradual. Las etiquetas de las variables “pendiente” y “cercanía a la costa” son trapezoidales (figura 5.1), que son funciones que representan la transición entre etiquetas de manera más abrupta. Se repite el mismo proceso para la variable de salida “susceptibilidad” (figura 5.2.). En todos los casos, se ha permitido un rango numérico de variación para cada variable de 0 a 10. La librería de lógica borrosa de Matlab ofrece una herramienta automatizada, el editor de sistemas de inferencia borrosa (FIS editor: *Fuzzy Inference System editor*) que permite editar cada variable, cada etiqueta y cada función de pertenencia.

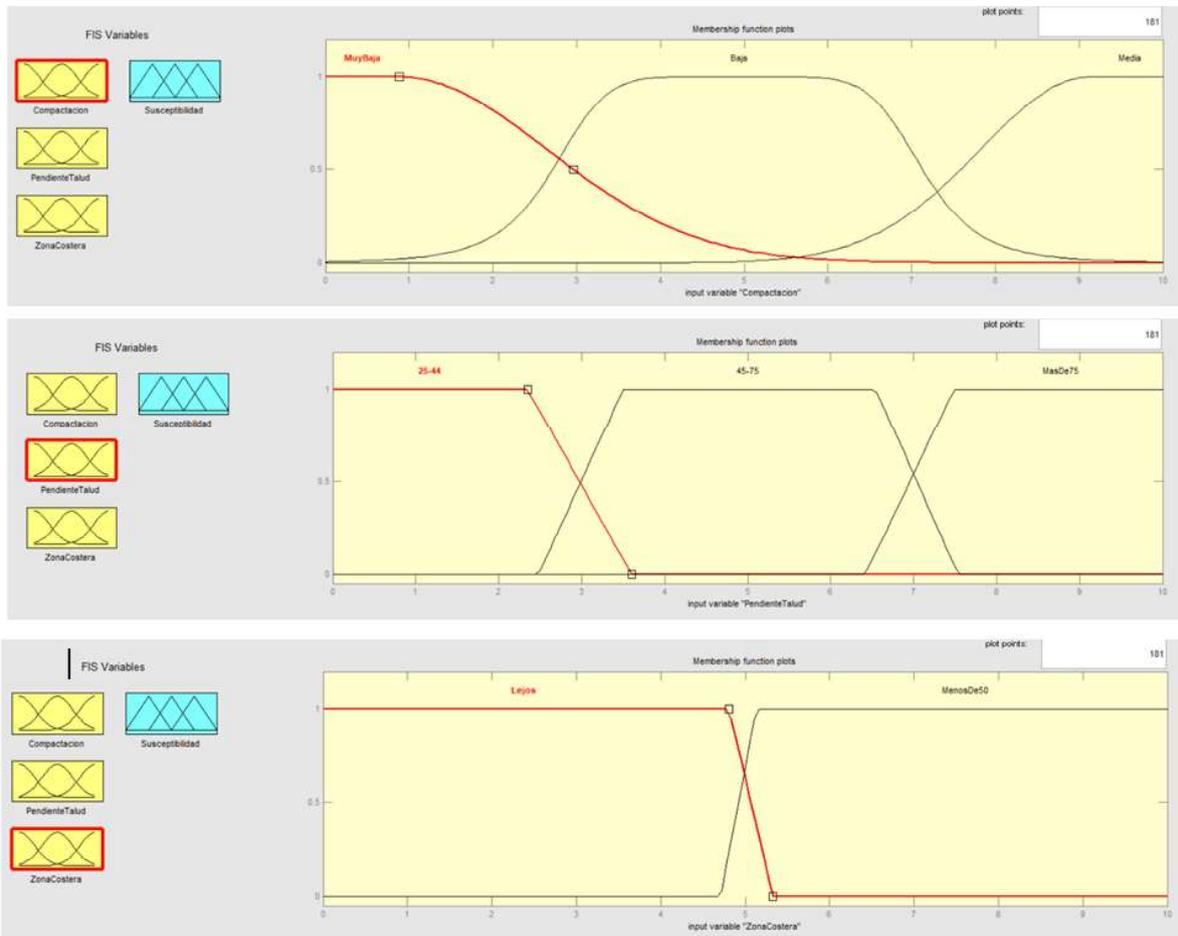


Figura 5.1. Funciones de pertenencia para las variables lingüísticas de entrada del macizo tipo B, de arriba a abajo “compactación”, “pendiente del talud” y “cercanía a zonas costeras”.

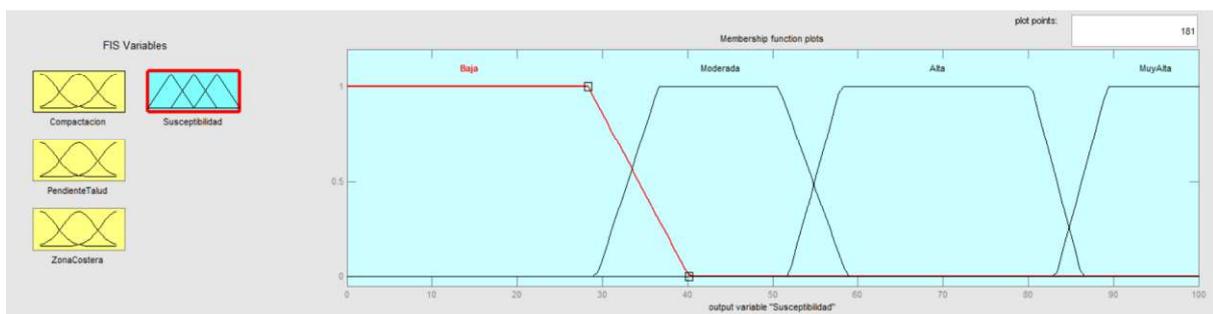


Figura 5.2. Funciones de pertenencia de la variable lingüística de salida “susceptibilidad”.

3. A continuación, con la ayuda de los expertos Luis González de Vallejo y Luis Hernández Gutiérrez, se diseñaron las reglas difusas que modelan la relación entre las diferentes variables. La figura 5.3 muestra las reglas si-entonces diseñadas para el macizo tipo B utilizando el editor FIS de Matlab. Para el macizo tipo A se diseñaron 48 reglas,

mientras que para los macizos tipos B y C se definieron 18 reglas. Todas estas bases de reglas pueden consultarse con mayor detenimiento en el Anejo 1 de este trabajo.

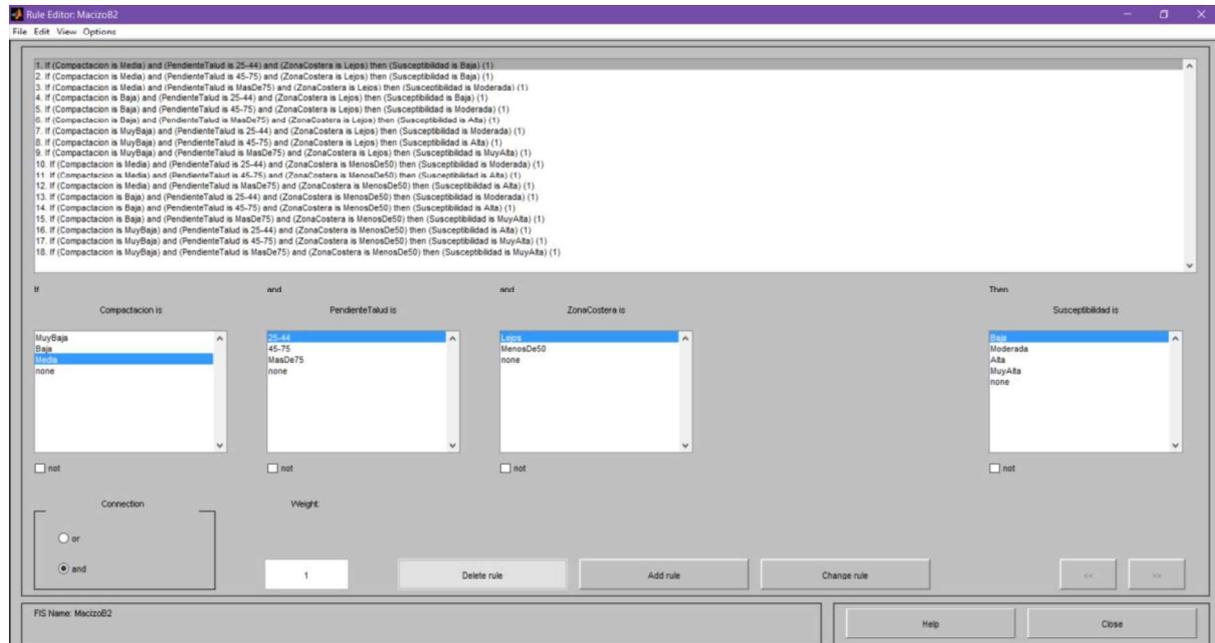


Figura 5.3. Reglas establecidas para el macizo tipo B.

4. Una vez definidas las variables, las etiquetas, las funciones de pertenencia y las reglas del sistema, se debe elegir en el editor FIS el método de inferencia y el método de desborrosificación a aplicar. En este caso, se ha seleccionado el método de Mamdani como método de inferencia, y el método del centroide como método de desborrosificación. El editor FIS proporciona una vista en la que se pueden introducir manualmente los valores de entrada al sistema borroso, estudiar la activación de cada regla por separado, el conjunto borroso de salida, y el valor del centroide de dicho conjunto que constituye la salida numérica final del sistema. En la figura 5.4 se muestra como ejemplo un hipotético talud con una “compactación” “baja” (entrada de 4,24 puntos, en el rango de 0 a 10), una “pendiente de talud” de “más de 75” (entrada de 7,22 puntos, en un rango de 0 a 10) y “lejos de zonas costeras”. Con estos valores se puede comprobar que hay una regla que se activa significativamente más que las demás: *Si la “compactación” del macizo tipo B es “baja”, la “pendiente del talud” es “de más de 75” y está “lejos de zonas costeras”, entonces, la “susceptibilidad del talud a la generación de inestabilidades” es “alta”*. El resultado final que ofrece el sistema es 64,8 (centroide del conjunto borroso de salida), valor numérico que efectivamente se corresponde a una susceptibilidad alta.

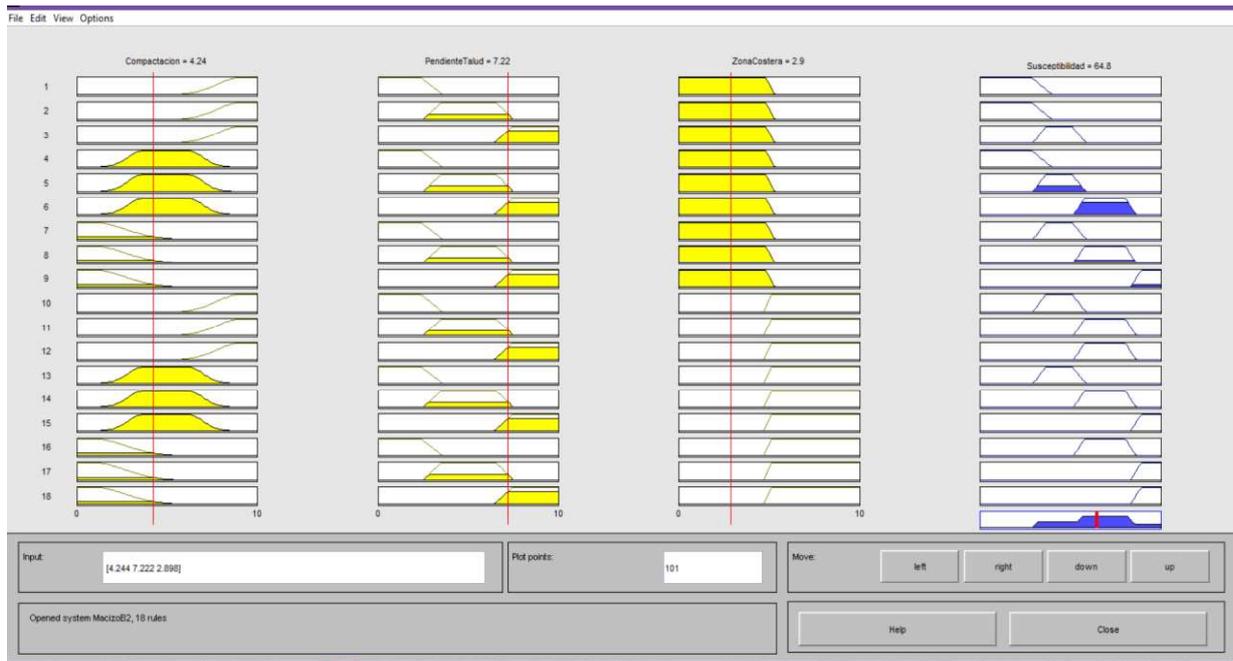


Figura 5.4. Introducción de valores y resultado del ISTV para el talud ejemplo.

El Anejo 1 del apartado 10 de este trabajo muestra las características de diseño de las variables lingüísticas y sus etiquetas y la relación de reglas diseñadas para cada subsistema.

6. Resultados y discusión

6.1. Datos de campo para los casos de estudio.

A continuación se presentan los seis taludes a los que se les aplicará el sistema de lógica difusa ISTV. Los taludes están enumerados del 1 al 6 para su posterior identificación en la tabla de resultados. Los taludes 1 y 2 corresponden a macizos tipo A, los taludes 3 y 4 pertenecen al tipo B, y los taludes 5 y 6 representan dos ejemplos de taludes tipo C.

-Talud 1 (El Mirador): Talud de coladas basálticas de gran competencia situado en la TF-5, entre los kilómetros 43 y 44, a la altura de la Gasolinera El Mirador de San Juan de la Rambla. (Figura 6.1)



Figura 6.1. Imagen del talud 1. (Fotos: Ana Miranda)

Se trata de un talud tipo A formado por coladas basálticas, moderadamente fracturado, ya que se observan entre 3 y 10 discontinuidades por metro lineal. En el sistema difuso se puntuará la fracturación con un 6. El buzamiento es alto puesto que las principales discontinuidades que se presentan forman planos paralelos a la superficie del talud, con ángulo cercano a los 90°. La puntuación del buzamiento para el sistema difuso será de 9. La pendiente es subvertical, con más de 75°, por lo que se introduce con una puntuación de 9 en el sistema difuso. Y el talud se encuentra en el interior por lo que no está afectado por la acción erosiva de la carrera de mareas, se puntúa con un 0. En cuanto a los indicadores del terreno, se observan grietas en el talud, no se aprecian rocas caídas porque la cuneta de protección no permite la visión, pero sí hay cicatrices de bloques desprendidos, lo que nos indica que hay caída de rocas. La tabla 6.1 resume los datos de este talud:

Tabla 6.1. Resumen datos de campo del talud 1.

	Talud 1- El Mirador	
	Talud Tipo A	
	Fracturación	Moderada
	Buzamiento	>40°
	Pendiente	>75°
	Cercanía a la costa	No
	Nº indicadores	2

-Talud 2 (Barranco de Ruiz): Talud formado por ignimbritas soldadas situado en la TF-5 entre los kilómetros 44 y 45, a la altura del Barranco de Ruiz. Ver figura 6.2:



Figura 6.2. Imagen del talud 2. (Fotos: Ana Miranda)

Se trata de un talud masivo Tipo A formado ignimbritas soldadas. Presenta muy pocas discontinuidades por lo que se considera que tiene un grado de fracturación masivo y se puntúa en el sistema difuso con un 1,42. Dado que no se forman planos de discontinuidad, no hay buzamiento, por lo que se puntúa con un 0. La pendiente es muy alta, se trata de un talud prácticamente vertical, por lo que se introduce con una puntuación de 9 en el sistema difuso. Y el talud se encuentra en el interior por lo que no está afectado por la acción erosiva de la carrera de mareas, se puntúa con un 0. El talud muestra solamente un indicador, grietas presentes en la parte alta del mismo. La tabla 6.2 resume los datos de este talud:

Tabla 6.2. Resumen datos de campo del talud 2.

	Talud 2- Bco Ruiz	
	Talud Tipo A	
	Fracturación	Masivo
	Buzamiento	<40°
	Pendiente	>75°
	Cercanía a la costa	No
	Nº indicadores	1

-Talud 3 (Montaña de El Socorro): Se encuentra en la incorporación de la TF-61 a la TF-1 en la Montaña del Socorro, Güímar. Se trata de un talud de piroclastos basálticos de caída. (Figura 6.3.)



Figura 6.3. Imagen del talud 3 y detalle de los piroclastos que lo forman. (Fotos: Ana Miranda)

Este es un talud que se encuentra en uno de los flancos del cono de piroclastos de caída que conforman la montaña de El Socorro, se trata de un talud tipo B. El grado de compactación que presenta es bajo, el material se arranca con facilidad con la ayuda de un martillo de geólogo, por lo que se introduce en el sistema borroso con un 7. La pendiente es de más de 75° por lo que se puntúa en el mayor rango de normalización del sistema borroso. No se trata de un talud a pie de acantilado por lo que no está afectado por la carrera de mareas. Se observan acumulaciones de depósitos al pie del talud, así como unas grandes grietas en forma de cuña en la cabecera, por lo que se consideran 2 indicadores en el terreno. Estos datos se resumen en la tabla 6.3:

Tabla 6.3. Resumen datos de campo del talud 3.

	Talud 3- Montaña del Socorro	
	Talud Tipo B	
	Compactación	Baja
	Pendiente	$>75^\circ$
	Cercanía a la costa	No
Nº indicadores	2	

-Talud 4 (Subida Fasnía): Talud tipo B formado por ignimbritas no soldadas y pómez de caída. Se encuentra en la carretera TF-620 de Fasnía, aproximadamente en el kilómetro 2,5. Se muestra una imagen en la figura 6.4:



Figura 6.4. Imagen del talud 4. (Fotos: Luis Hernández y Ana Miranda)

Las ignimbritas soldadas de este talud presentan una buena compactación, en el sistema se introduce un 8 para esta variable. Como se observa en la imagen del talud, la pendiente es muy alta, de más de 75° , por lo que se puntúa con un 8 en el sistema difuso del ISTV. El talud no está afectado por la carrera de mareas, se introduce como 0 en el sistema, sin embargo se observan grietas marcadas en el talud por lo que se indica que hay 1 indicador en el terreno. Los datos de campo del talud 4 se resumen en la tabla 6.4:

Tabla 6.4. Resumen datos de campo del talud 4.

	Talud 4- Subida Fasnía TF 620	
	Talud Tipo B	
	Compactación	Media
	Pendiente	$>75^\circ$
	Cercanía a la costa	No
	Nº indicadores	2

-Talud 5 (Las Eras): Se trata del talud que se encuentra tras el puente que cruza la TF-1 en el kilómetro 35, correspondiente a la salida de Las Eras en dirección sur. Está formado por piroclastos de diversa naturaleza y textura, con distintos grados de compactación, predominando la presencia de pómez. (GrafCan).



Figura 6.5. Imagen del talud 5. (Foto: Ana Miranda)

Talud tipo C, con alternancia de materiales piroclásticos que se han erosionado de manera diferencial. La erosión actual no presenta formación de cornisas ni importantes cavidades por lo que se considera un grado de erosión diferencial medio, que se normaliza en el sistema borroso con un 2. La pendiente es elevada, de más de 75° , prácticamente vertical, por lo que se introduce con un 9,5 en el sistema. El talud está en la autopista TF-1 por lo que no está afectado por la erosión de las mareas. Sí se observan caída de rocas y tierras y acumulación de depósitos en la ladera, por lo que este talud presenta 2 indicadores en el terreno. La tabla 6.5 resume los datos del talud:

Tabla 6.5. Resumen datos de campo del talud 5.

	Talud 5- TF1 Las Eras	
	Talud Tipo C	
	Erosión diferencial	Media
	Pendiente	$>75^\circ$
	Cercanía a la costa	No
Nº indicadores	2	

-Talud 6 (Polígono La Campana): Este talud se encuentra en el carril de subida del Enlace Uno Subida Tablero. Tal y como muestra la figura 6.6 se trata de un talud formado por alternancias de coladas basálticas con escorias.



Figura 6.6. Imagen del talud 6. (Fotos: Ana Miranda)

El talud está formado por varias capas de alternancias de coladas basálticas con escorias y presenta una importante cavidad con formación de cornisas que se introduce en el sistema con un 8, igual que su pendiente ya que es de más de 75°. No se encuentra afectado por la erosión marina pero sí que se observan grietas en el talud así como caídas de bloques al pie del mismo. Se deberá multiplicar el resultado obtenido del sistema difuso por un *índice i* de 1,2 al presentar dos indicadores en el terreno. En la tabla 6.6 se resumen los datos obtenidos del talud:

Tabla 6.6. Resumen datos de campo del talud 6.

	Talud 6- Polígono La Campana	
	Talud Tipo C	
	Erosión diferencial	Con cornisas
	Pendiente	>75°
	Cercanía a la costa	No
	Nº indicadores	2

6.2. Resultados del ISTV por el sistema difuso.

En este apartado se presentan los resultados de los seis taludes estudiados en una tabla resumen, (Tabla 6.7) que muestra todos los taludes y en la que se indica el tipo del talud del que se trata, su ubicación y coordenadas, el resultado del $ISTV_{básico}$ con su correspondiente grado de susceptibilidad y por último el $ISTV_{corregido}$ con el grado de susceptibilidad asociado.

Tabla 6.7. Tabla resumen con los datos de los taludes y resultado del ISTV.

Nº	Tipo	Ubicación	Coordenadas	$ISTV_{básico}$	Susceptibilidad básica	$ISTV_{corregido}$	Susceptibilidad corregida
1	A	Gasolinera El Mirador (San Juan de la Rambla)	28°23'34"N 16°36'56"W	93	Muy alta	112	Muy alta
2	A	Bco Ruiz (Los Realejos)	28°23'30"N 16°37'31"W	20,3	Baja	24	Baja
3	B	Montaña del Socorro (Güímar)	28°18'3"N 16°22'40"W	61,2	Alta.	73	Alta.
4	B	Subida Fasnía TF620	28°13'31"N 16°25'46"W	46,5	Moderada	55,8	Alta.
5	C	Talud TF1-Las Eras	28°12'02"N 16°25'35"W	69,1	Alta.	82,92	Muy alta
6	C	Conex. Pol La Campana	28°25'14"N 16°18'58"W	83,6	Muy alta	100,32	Muy alta

Una vez obtenidos los resultados se han ordenado en función del $ISTV_{básico}$, en la tabla 6.8 con el fin de obtener la relación ordenada objeto de este trabajo.

Tabla 6.8. Resultados del ISTV ordenados por susceptibilidad a las inestabilidades.

Nº	Tipo	ISTVbásico	Susceptibilidad básica	Imagen del talud
2	A	20,3	Baja	
4	B	46,5	Moderada	
3	B	61,2	Alta.	
5	C	69,1	Alta.	
6	C	83,6	Muy alta	
1	A	93	Muy alta	

6.3. Validación.

Una vez obtenidos los resultados de la aplicación del sistema de lógica difusa del ISTV, se han cruzado con la opinión de las 12 personas encuestadas que han valorado los taludes según la percepción que tenían al ver las imágenes. En primer lugar, han valorado la susceptibilidad de cada talud por separado (Figura 6.8), después se les pidió que los ordenaran de mayor a menor de menor a mayor susceptibilidad el resultado se observa en la tabla 6.9.

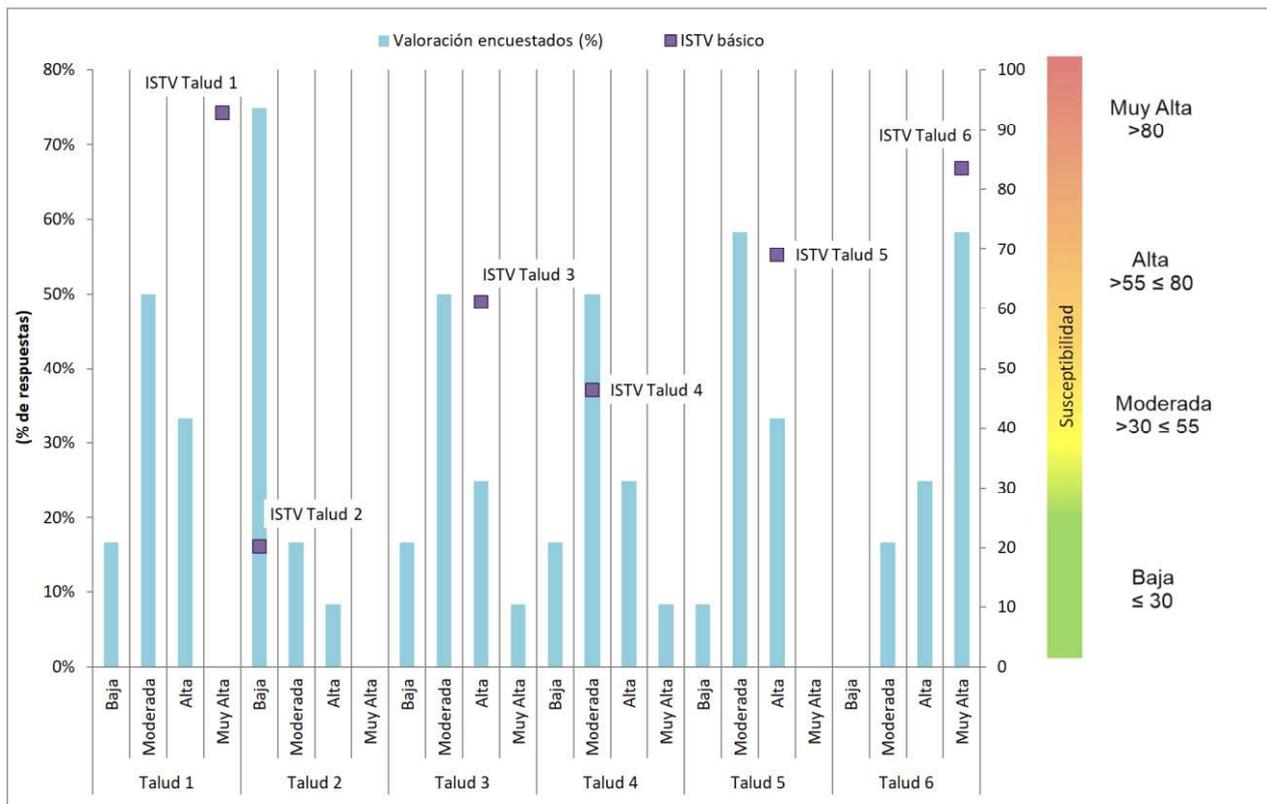


Figura 6.8. Valores obtenidos mediante el ISTV y percepción de los encuestados.

En la gráfica de la figura 6.8 se observa en columnas, las respuestas de las personas encuestadas, y en puntos, el resultado del ISTV básico para cada talud. Se observa que en el talud 1 ninguno de los encuestados lo consideró de susceptibilidad muy alta, mientras que teniendo en cuenta las discontinuidades y la inclinación de los planos que la forman, además de su elevada pendiente, el ISTV lo valora con susceptibilidad muy alta. En el caso del talud 2, el 75% de los encuestados coinciden con el resultado del ISTV básico en que se trata de un talud con baja susceptibilidad a las inestabilidades, por tratarse de un talud masivo, en el que a pesar de su pendiente, la ausencia discontinuidades no forma bloques que puedan precipitar. El talud 3 obtiene como salida del ISTV básico una susceptibilidad alta, debido a que la compactación de sus partículas es baja y la pendiente

que presenta condiciona su estabilidad, sin embargo, el 50% de los encuestados lo valora como susceptibilidad moderada. Para el talud 4 se obtiene un ISTV básico que indica susceptibilidad moderada, ya que aunque son piroclastos de caída, no tienen mala compactación, el 50% de los encuestados coincidió con el resultado del ISTV para este caso, mientras que casi el 17% lo consideró de susceptibilidad baja, el 25% alta y algo más del 8% lo consideró de susceptibilidad muy alta. El talud 5 fue considerado de susceptibilidad moderada en el 58,3% de los casos, alta en el 33,3% y baja por el 8,3% de los encuestados, el ISTV básico, obtiene un resultado de susceptibilidad alta para este talud, coincidiendo con el 33,3% de los encuestados. El talud 6 es valorado por el 75% de los encuestados como de susceptibilidad muy alta, valor que también le da el ISTV básico calculado mediante el método difuso.

La tabla 6.9 ordena en primer lugar los taludes según el cálculo mediante el sistema difuso, y después la apreciación de los 10 encuestados que ordenaron los taludes según su percepción la peligrosidad de cada uno de ellos.

Tabla 6.9. Orden de los taludes según su peligrosidad, comparativa de valores ISTV con la percepción de los encuestados.

Valores ISTV	Encuestado 1	Encuestado 2	Encuestado 3	Encuestado 4	Encuestado 5	Encuestado 6	Encuestado 7	Encuestado 8	Encuestado 9	Encuestado 10

Tanto la gráfica 6.8 como la tabla 6.9 muestran discrepancias entre las opiniones de los encuestados y los resultados obtenidos mediante el método difuso diseñado en este trabajo. Estas discrepancias, por un lado se deben a que las valoraciones de los encuestados se basan en la apreciación de una serie de fotos (una para cada talud), lo cual no permite la observación de todos los factores a tener en cuenta y limita la posibilidad de valorarlos debido a la falta de información. Por otro lado, este resultado indica que aún con

conocimientos en geotecnia, la percepción de cada persona es distinta, por lo que es importante fijar los parámetros que han de tenerse en cuenta y cómo valorarlos, tal y como hace el ISTV.

7. Conclusiones

En este trabajo se han establecido los factores que influyen en la estabilidad de laderas y taludes volcánicos, con los que se ha diseñado un sistema borroso para el cálculo del Índice de Susceptibilidad de Inestabilidades en Taludes Volcánicos, (ISTV) que cumple con el objetivo de este trabajo de realizar una valoración de los taludes y ordenarlos en función de dicha susceptibilidad.

Aunque el ISTV permite realizar una relación ordenada de los taludes, penaliza en exceso las pendientes elevadas, que por otra parte son las más frecuentes en los taludes canarios, por lo que sería necesario realizar una calibración de las reglas difusas en las que interviene la pendiente del talud. Sin embargo, de este trabajo se extrae que la teoría de conjuntos difusos o borrosos es adecuada para este tipo de análisis, en los que existe incertidumbre a la hora de valorar los distintos factores intervinientes.

Es necesario tener en cuenta que el diseño de las reglas borrosas se ha realizado conforme a la opinión de dos expertos que trabajan en el mismo proyecto, por lo que el sistema refleja únicamente una línea de pensamiento. Consecuentemente, sería conveniente realizar una consulta a un grupo más amplio de expertos con experiencia en estabilidad de laderas y taludes y externo al proyecto MACASTAB para realizar una calibración de los parámetros y su influencia en la estabilidad de los taludes.

8. Líneas de trabajo futuro

En primer lugar las líneas de trabajo futuro deberían enfocarse en la consulta de un mayor número de expertos en la materia que permita perfeccionar el sistema, abrir la configuración de las reglas difusas y ajustarlas para que no reproduzcan un pensamiento individual.

Una vez la definición de las reglas sea satisfactoria se prevé la programación de una APP, para facilitar el cálculo del ISTV a pie de talud y la digitalización, almacenamiento y catalogación de la información.

Administraciones como el Servicio de Conservación de Carreteras del Cabildo de Tenerife podrían usar la aplicación para que sus técnicos hicieran llegar la información a las oficinas en tiempo real y de esta manera tener un inventario de taludes ordenado según la susceptibilidad obtenida, lo que dará una idea de cuál necesita ser estudiado con urgencia.

9. Bibliografía

- Daftaribesheli, A., Ataei, M., & Sereshki, F. (2011). Assessment of rock slope stability using the fuzzy slope mass rating (FSMR) system. *Applied Soft Computing Journal*, 11(8), 4465-4473. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.08.032>
- Ferrer, M. y González de Vallejo, L. I. (2007) *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos* (2da. Edición). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, pp 134.
- GrafCan, Descripción de las Unidades Geológicas de Tenerife. [En línea]. Gobierno de Canarias. Disponible en Web: http://www.idecanarias.es/resources/GEOLOGICO/TF_LITO_unidades_geologicas.pdf [último acceso 29/05/2018]
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo. C.,(2010) *Ingeniería geológica*. Prentice Hall Pearson Educación, Madrid, pp 750.
- Gutiérrez-García, F. J., Alayón-Miranda, S., González-Díaz, E., & Pérez-Díaz, P. (2017). Modelo borroso para el cálculo de dosificaciones de morteros de cemento. *Dyna (Spain)*, 92(6), 688-695. <https://doi.org/10.6036/8406>
- Hernández Gutiérrez, L. E. (2014). Tesis Doctoral : CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA LAS ISLAS CANARIAS.
- Hernández Gutiérrez, L.E. (2018). Guías geotécnicas aplicables a proyectos y obras en terrenos volcánicos: de GETCAN a MACASTAB. 6as Jornadas Luso-Españolas de Geotecnia. Ponta Delgada, Azores, Portugal, mayo 2018.
- Hernández Gutiérrez, L.E.; Santamarta, J.C.; Ramos Villar, A.; Luque, J.; Hernández Durán, G.; Hernández Rodríguez, I.; Asensio, C.; Santana, A. (2015). Estabilidad de laderas en medios volcánicos. Ingeopres nº 239, febrero 2015. Edi. Interempresasmedia. ISSN 1136-4785. Pág. 44-51.
- Macías Bernal, J.M., Calama-Rodríguez, J.M., Chávez-de Diego, M. J. (2014). Modelo de predicción de la vida útil de la edificación patrimonial a partir de la lógica difusa.

Informes de la Construcción, 66, (533): e006.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.107>

Mamdani E (1974), "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, vol. 121-12, p. 1585-1588. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/piee.1974.0328>

Matlab, "The MathWorks, Inc". [En línea]. Disponible en Web: <http://www.mathworks.com> [último acceso 29/05/2018]

Montalar, E. Romana, M., & Serón, J. B. (2001). La clasificación geomecánica SMR: aplicación experiencias y validación. *Research GAtE*, (May).

Park, H. J., Um, J. G., Woo, I., & Kim, J. W. (2012). Application of fuzzy set theory to evaluate the probability of failure in rock slopes. *Engineering Geology*, 125, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.11.008>

Schmincke, H.U. & Sumita, M. (2010). *Geological Evolution of the Canary Islands*. Germany: Görres-Verlag.

Wilson, J. T. (1973). Mantle plumes and plate motions. *Tectonophysics*, 19(2), 149-164.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control* 8, 338-353.

10. Anexos

Anexo 1: Relación de variables y reglas lingüísticas para el sistema de conjuntos difusos.

En este anexo se presentan los criterios de diseño de los tres subsistemas que se emplearon para el ISTV. Se detallan las variables de entrada de cada uno de los subsistemas, sus etiquetas, el rango de representación de cada etiqueta y el tipo de función utilizada para su representación (tabla 10.1 para el macizo tipo A; tabla 10.3 para el macizo tipo B; y tabla 10.5 para el macizo tipo C). Las tablas 10.2, 10.4 y 10.6, describen la relación de reglas diseñadas para cada subsistema, A, B y C respectivamente. Por último, la tabla 10.7 presenta las variables de salida del sistema, sus etiquetadas, rangos y funciones de pertenencia.

Tabla 10.1 Variables de entrada Macizo Tipo A.

Macizo Tipo A			
Variables de entrada	Etiqueta	Rango	Función pertenencia
Fracturación	Masivo	0-2	Gaussiana
	Poco fracturado	2-4	Campana generalizada
	Moderadamente fracturado	4-7	Campana generalizada
	Muy fracturado	7-10	Campana generalizada
Buzamiento	<40	0-5	Trapezoidal
	>40	5-10	Trapezoidal
Pendiente	25°-44°	0-3	Trapezoidal
	45°-75°	3-7	Trapezoidal
	>75°	7-10	Trapezoidal
Zona Costera	No	0-5	Trapezoidal
	Sí	5-10	Trapezoidal

Tabla 10.2 Reglas del subsistema Macizo Tipo A.

Macizo Tipo A	Antecedentes				Consecuente
	Regla nº	Fracturación	Buzamiento	Pendiente	Zona Costera
1	Masivo	<40	25º-44º	No	Baja
2	Masivo	>40	25º-44º	No	Baja
3	Masivo	<40	45º-75º	No	Baja
4	Masivo	>40	45º-75º	No	Baja
5	Masivo	<40	>75º	No	Baja
6	Masivo	>40	>75º	No	Moderada
7	Masivo	<40	25º-44º	SÍ	Baja
8	Masivo	>40	25º-44º	SÍ	Baja
9	Masivo	<40	45º-75º	SÍ	Baja
10	Masivo	>40	45º-75º	SÍ	Baja
11	Masivo	<40	>75º	SÍ	Moderada
12	Masivo	>40	>75º	SÍ	Alta
13	Poco Fracturado	<40	25º-44º	No	Baja
14	Poco Fracturado	>40	25º-44º	No	Baja
15	Poco Fracturado	<40	45º-75º	No	Baja
16	Poco Fracturado	>40	45º-75º	No	Baja
17	Poco Fracturado	<40	>75º	No	Moderada
18	Poco Fracturado	>40	>75º	No	Alta
19	Poco Fracturado	<40	25º-44º	SÍ	Moderada
20	Poco Fracturado	>40	25º-44º	SÍ	Moderada
21	Poco Fracturado	<40	45º-75º	SÍ	Moderada
22	Poco Fracturado	>40	45º-75º	SÍ	Moderada
23	Poco Fracturado	<40	>75º	SÍ	Alta
24	Poco Fracturado	>40	>75º	SÍ	Muy Alta
25	Mod. Fracturado	<40	25º-44º	No	Baja
26	Mod. Fracturado	>40	25º-44º	No	Baja
27	Mod. Fracturado	<40	45º-75º	No	Moderada
28	Mod. Fracturado	>40	45º-75º	No	Alta
29	Mod. Fracturado	<40	>75º	No	Alta
30	Mod. Fracturado	>40	>75º	No	Muy Alta
31	Mod. Fracturado	<40	25º-44º	SÍ	Moderada
32	Mod. Fracturado	>40	25º-44º	SÍ	Moderada
33	Mod. Fracturado	<40	45º-75º	SÍ	Alta
34	Mod. Fracturado	>40	45º-75º	SÍ	Alta
35	Mod. Fracturado	<40	>75º	SÍ	Muy Alta
36	Mod. Fracturado	>40	>75º	SÍ	Muy Alta
37	Muy Fracturado	<40	25º-44º	No	Baja
38	Muy Fracturado	>40	25º-44º	No	Baja
39	Muy Fracturado	<40	45º-75º	No	Alta
40	Muy Fracturado	>40	45º-75º	No	Alta
41	Muy Fracturado	<40	>75º	No	Muy Alta
42	Muy Fracturado	>40	>75º	No	Muy Alta

43	Muy Fracturado	<40	25°-44°	SÍ	Moderada
44	Muy Fracturado	>40	25°-44°	SÍ	Moderada
45	Muy Fracturado	<40	45°-75°	SÍ	Muy Alta
46	Muy Fracturado	>40	45°-75°	SÍ	Muy Alta
47	Muy Fracturado	<40	>75°	SÍ	Muy Alta
48	Muy Fracturado	>40	>75°	SÍ	Muy Alta

Tabla 10.3 Variables de entrada Macizo Tipo B.

Macizo Tipo B			
Variables de entrada	Etiqueta	Rango	Función pertenencia
Compactación	Media	0-3	Gaussiana
	Baja	3-7,5	Campana generalizada
	Muy Baja	7,5-10	Gaussiana
Pendiente	25°-44°	0-3	Trapezoidal
	45°-75°	3-7	Trapezoidal
	>75°	7-10	Trapezoidal
Zona Costera	No	0-5	Trapezoidal
	Sí	5-10	Trapezoidal

Tabla 10.4 Reglas del subsistema Macizo Tipo B.

Macizo Tipo B	Antecedentes			Consecuente
	Compactación	Pendiente	Zona Costera	Susceptibilidad
1	Media	25°-44°	No	Baja
2	Media	45°-75°	No	Baja
3	Media	>75°	No	Moderada
4	Baja	25°-44°	No	Baja
5	Baja	45°-75°	No	Moderada
6	Baja	>75°	No	Alta
7	Muy Baja	25°-44°	No	Moderada
8	Muy Baja	45°-75°	No	Alta
9	Muy Baja	>75°	No	Muy Alta
10	Media	25°-44°	SÍ	Moderada
11	Media	45°-75°	SÍ	Alta
12	Media	>75°	SÍ	Alta
13	Baja	25°-44°	SÍ	Moderada
14	Baja	45°-75°	SÍ	Alta
15	Baja	>75°	SÍ	Muy Alta
16	Muy Baja	25°-44°	SÍ	Alta
17	Muy Baja	45°-75°	SÍ	Muy Alta
18	Muy Baja	>75°	SÍ	Muy Alta

Tabla 10.5 Variables de entrada Macizo Tipo C.

Macizo Tipo C			
Variables de entrada	Etiqueta	Rango	Función pertenencia
Erosión	Media	0-2,5	Gaussiana
	Alta	2,5-7,5	Gaussiana
	Cornisa	7,5-10	Gaussiana
Pendiente	25°-44°	0-3	Trapezoidal
	45°-75°	3-7	Trapezoidal
	>75°	7-10	Trapezoidal
Zona Costera	No	0-5	Trapezoidal
	Sí	5-10	Trapezoidal

Tabla 10.6 Reglas del subsistema Macizo Tipo C.

Macizo Tipo C	Antecedentes			Consecuente
	Erosión	Pendiente	Zona Costera	Susceptibilidad
1	Media	25°-44°	No	Baja
2	Media	45°-75°	No	Moderada
3	Media	>75°	No	Alta
4	Media	25°-44°	Sí	Moderada
5	Media	45°-75°	Sí	Alta
6	Media	>75°	Sí	Muy Alta
7	Alta	25°-44°	No	Baja
8	Alta	45°-75°	No	Moderada
9	Alta	>75°	No	Alta
10	Alta	25°-44°	Sí	Moderada
11	Alta	45°-75°	Sí	Alta
12	Alta	>75°	Sí	Muy Alta
13	Cornisa	25°-44°	No	Moderada
14	Cornisa	45°-75°	No	Alta
15	Cornisa	>75°	No	Muy Alta
16	Cornisa	25°-44°	Sí	Alta
17	Cornisa	45°-75°	Sí	Muy Alta
18	Cornisa	>75°	Sí	Muy Alta

Tabla 10.7 Variables de salida de los tres subsistemas.

Salida sistema difuso			
Variable de salida	Etiqueta	Rango	Función pertenencia
Susceptibilidad	Baja	0-30	Trapezoidal
	Moderada	30-55	Trapezoidal
	Alta	55-80	Trapezoidal
	Muy Alta	80-100	Trapezoidal