



Trabajo completo correspondiente al artículo:

Propuesta de indicadores para la gestión de taludes de corte y de terraplén

Autores: Paul Garnica Anguas, José Antonio Ramírez Culebro y Carlos Pérez García.

Publicado en el número especial de la revista *Carreteras*:

“Premio Internacional a la Innovación en Carreteras
Juan Antonio Fernández del Campo”. VI Edición 2015-2016

Nº 214, julio – agosto 2017

**PROPUESTA DE INDICADORES PARA LA
GESTIÓN DE TALUDES DE CORTE Y DE
TERRAPLEN**

Septiembre 2016

ÍNDICE

CAPITULO I. MODELO DE GESTIÓN.	1
CAPITULO II. GESTIÓN DE RIESGO DE CORTES Y TERRAPLENES CARRETEROS	2
CAPITULO III. FACTORES Y PROCEDIMIENTOS CALIFICATIVOS DEL INDICADOR GENERAL DE ESTABILIDAD (IGE).	5
CAPITULO IV. CLASIFICACIÓN DE DATOS MEDIANTE LA EVALUACIÓN CON ESTADÍSTICA MULTIVARIANTE.	33
CAPITULO V. EVALUACIÓN DEL TRAMO PILOTO	37
CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	

CAPITULO I. MODELO DE GESTIÓN

Cada vez es más importante contar con información precisa y de calidad para una correcta toma de decisiones acerca de infraestructuras territoriales de una determinada región. Actualmente, las administraciones de la gestión de carreteras han empezado a invertir parte de sus recursos en estudios y análisis de las características de la red viaria, así como en herramientas para trabajar adecuadamente con los datos obtenidos.

1.1 NECESIDAD DE REDUCIR EL RIESGO

Debido a los riesgos que corren los usuarios, así como a las pérdidas económicas de las concesionarias, se inicia la búsqueda de un método sistemático y lógico capaz de lograr que los niveles de riesgo de los cortes y terraplenes se mantengan en los valores más convenientes (Figura 1) para ayudar a prevenir catástrofes para los usuarios, así como para ayudar a determinar los costos eficientes de reparación en un tiempo adecuado.

1.2 ESTABILIDAD DE TALUDES

Usualmente los derrumbes o fallas de los taludes son el resultado de una serie de factores que deberán ser comprendidos, ya que estos son de vital importancia. La mayoría de la literatura referente a este tema enfatiza la importancia del conocimiento fundamental de los factores que manipulan la transición de estado estable a inestable.

La estabilidad de un talud depende en general de factores propios como su naturaleza, estructura, estratigrafía, condiciones de meteorización; de circunstancias externas al propio talud o ambientales, como la topografía de la zona, el clima, la vegetación. Las condiciones de régimen hidráulico superficial son vitales, así como la gravedad como factor desequilibrante. Siempre que la gravedad esté compensada con la resistencia del terreno, el talud estará en equilibrio, por el contrario, cuando el equilibrio se rompa se producirá una inestabilidad de la masa en forma de deslizamientos, desprendimientos, etc.

1.3 GESTIÓN DE ACTIVOS

Se define a la gestión de activos como: un proceso sistemático de mantenimiento que opera y mejora los activos, combinando los conocimientos de ingeniería con sondeos prácticos comerciales y razonamiento económico, para proveer herramientas que faciliten una mejor organización y una estrategia flexible para poder tomar las decisiones correctas y necesarias de acuerdo a las necesidades del usuario (*PIARC, 2008*).

1.4 GESTIÓN DE ACTIVOS GEOTÉCNICOS

A partir del seguimiento que se le ha dado durante años a los costos de reparación de muchas vías del país, se ha notado que muchos de los fracasos y costos, son atribuibles a las fallas de los taludes existentes; por ello se tiene incursión en la exploración de activos geotécnicos. Se ha determinado que una parte importante en la evaluación de las carreteras es conocer el desempeño de cada corte y terraplén que se presente en el tramo evaluado. Así entonces, en base a las investigaciones de la PIARC (2008), podemos decir que la gestión de cortes y/o terraplenes carreteros es un plan estratégico que nos ayudará a crear soluciones asociadas al desempeño, riesgos y gastos que representa el talud durante la vida útil de la vía en que se encuentra.

1.5 GESTIÓN CON DESARROLLO GRADUAL

Debido a la falta de experiencia de las empresas encargadas de las carreteras de nuestro país, en lo que respecta a los aspectos de gestión de activos geotécnicos; se propone, una estrategia de desarrollo gradual. La experiencia obtenida por los ingenieros encargados del mantenimiento, evaluación tras evaluación, ayudará a ajustar los objetivos específicos en función de los logros y dificultades encontradas. Se espera de este modo que muchos beneficios se obtengan gradualmente y no sea crítico el impacto de los posibles fracasos.

CAPITULO II. GESTIÓN DE RIESGO DE CORTES Y TERRAPLENES CARRETEROS

La metodología para la evaluación de cortes y terraplenes permitirá mejorar la planificación del desarrollo de la infraestructura carretera, a mediano y largo plazo, brindando información sobre la evolución esperada de la condición de los cortes y/o terraplenes carreteros.

Para poder desarrollar un sistema de administración de riesgos, el primer paso es identificar cuáles son los sitios en los que se han presentado con mayor frecuencia las fallas, cuáles han sido las causas y frecuencias de dichas fallas, afectación al sistema vial, y si han recibido un tratamiento adecuado.

La mayoría de problemas en las vías son ocasionados por las fallas de taludes y presentan un alto porcentaje de índole superficial por lo que la evaluación es simplemente visual. La información se recolecta mediante observaciones directas del terreno a nivel de la rasante de la carretera. La investigación consiste en una inspección geotécnica y las valoraciones que se realizan son de tipo cualitativo.

2.1 EVALUACIÓN PRELIMINAR

Antes de otorgar cualquier rango de puntuación a los diferentes factores de fallas de los taludes (solo para cortes), necesitamos conocer los sitios que representan mayor riesgo, esto para no perder tiempo ni dinero en la evaluación de cortes que no requieren atención alguna.

La evaluación preliminar se determinará en base al peligro que se observa en cada corte y el riesgo que esto representa a las vulnerabilidades que se tienen. El sistema utilizado para evaluar preliminarmente a los cortes, se plantea de acuerdo a las prácticas de los departamentos de protección civil de países como México, Colombia y Costa Rica. El criterio se basa en una matriz de doble entrada (Tabla 1), que contiene parámetros de clasificación muy subjetivos.

Tabla 1.- Matriz de peligro y vulnerabilidad para la obtención del riesgo preliminar

		Riesgo			
		Alto	Alto	Muy alto	Muy alto
Peligro	Muy alto	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto
	Alto	Medio	Medio	Alto	Muy alto
	Medio	Bajo	Medio	Medio	Alto
	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Alto
		Baja	Media	Alta	Muy alta
		Vulnerabilidad			

2.2 SISTEMA DE BASE DE DATOS

El levantamiento masivo de datos de los cortes y terraplenes carreteros permite disponer de gran detalle sobre la red vial y su almacenamiento en forma ordenada implica una serie de ventajas. La base de datos estará formada por los factores que ayudan a calcular el Indicador General de Estabilidad (IGE) y deberá incluir todos aquellos datos representativos de la situación de los cortes y/o terraplenes que quedaron fuera del sistema, por ejemplo la Información ordenada secuencialmente por meses (preferentemente por días) acerca de las precipitaciones pluviales en los tramos de más incidencia de fallas, así como los más importantes socialmente; el Tráfico diario promedio cuantificado en las etapas más relevantes del año, así como en los cambios de períodos; cualquier cambio en las características geométricas del talud, detallando la posible causa; cualquier cambio en las características geométricas de la vía, detallando las posibles causa y; los cambios en los aspectos socioeconómicos.

La calidad y precisión con la que se obtenga los factores que formarán la base de datos, así como la organización y formatos brindados por el cuerpo técnico de administración; darán como resultado una fuente de información capaz de poder ayudar a organizar diversos planes y estrategias de solución. Cada factor que se presenta para el cálculo del Indicador General de Estabilidad (IGE) está evaluado mediante el peligro que representa. A su vez, la sumatoria de todos los peligros existentes, nos darán como resultado un riesgo. El riesgo resultante define en términos abstractos la estabilidad que presenta

cada corte y/o terraplén. La estabilidad no difiere de la inestabilidad pues son términos que acentúan lo mismo.

2.3 INDICADOR GENERAL DE ESTABILIDAD (IGE)

El Indicador General de Estabilidad (IGE) para cortes y terraplenes es el grado de estabilidad de un talud de corte y/o terraplén respecto al riesgo que representa, está basado totalmente en la experiencia y juicio del Ingeniero evaluador y nace de la necesidad de tener una herramienta capaz de identificar mediante la integración y asociación de los factores más relevantes y condicionantes de una forma rápida y práctica, el nivel de riesgo de falla, para posteriormente programar las actividades de mantenimiento necesarias en el tiempo adecuado.

El IGE es el resultado de la sumatoria de puntuaciones numéricas que se les otorga a cada uno de los factores que se han establecido como principales responsables de la falla en un talud, ya sea en corte o terraplén. La sumatoria de puntuaciones supondrá la inestabilidad que existe, designando como grado alto a la puntuación mayor ($IGE_{CC} > 400$; $IGE_{TC} > 300$) y grado bajo a la puntuación menor ($IGE_{CC} < 200$; $IGE_{TC} < 150$). Es decir que entre más se eleve el valor del IGE, mayor será su inestabilidad y debería de tener mayor prioridad en el respectivo mantenimiento. Los rangos de puntuaciones para designar el nivel de inestabilidad se explican más adelante.

2.4 PUNTUACIÓN PARA LOS FACTORES

Las puntuaciones que se otorgan a cada factor, han sido investigadas desde el nacimiento del RMR (*Rock Mass Rating, Bieniawski, 1984*) que, a pesar de ser para el estudio de túneles, es pionera de varias metodologías de evaluación de fallas en rocas, como el RHR (*Rock Hazard Rating, Pierson – Van Vickle, 1993*). Las investigaciones para el RHR, llevaron a la necesidad de poder distinguir entre un evento poco desastroso hasta el evento más desastroso posible. Esto produjo una evaluación de factores causantes de riesgo mediante las categorías de: bajo peligro, mediano peligro, alto peligro y muy alto peligro.

Estas categorías han pretendido encerrar el nivel de severidad presentado en un evento de falla y ser indicadoras de lo que puede suceder. De acuerdo al RHR, las puntuaciones para los factores causantes de riesgo son establecidos a partir de un aumento de escala de los valores de entre 1 y 4 por medio de una función exponencial ($y = 3^x$) que permite apreciar de una mejor manera el nivel de inestabilidad o estabilidad que se presenta. Por lo tanto, los valores numéricos con los que se otorgará una calificación a cada factor causante de riesgo se presentan en la siguiente Tabla:

Tabla 2.- Puntuaciones para cada factor causante de riesgo

PUNTUACIONES	NIVEL
3	Bajo
9	Medio
27	Alto
81	Muy alto

2.5 IMPORTANCIA DE LA APLICACIÓN DEL IGE.

Los cortes o terraplenes carreteros que se presenten en cualquier tramo, tendrán cierto grado de inestabilidad diferente. El IGE, pretende ser un calificativo para poder desarrollar planes de mantenimiento óptimos. La importancia de obtener un IGE (IGE_{CC} , cortes carreteros; IGE_{TC} , terraplenes carreteros) radica en un resultado inmediato al evaluar en campo. La acumulación de todos los valores IGE a lo largo de un tramo carretero, nos revelarán los niveles de inestabilidad actuantes.

En el caso de una primera evaluación, se tendría solo una gráfica de IGE, que marcaría a los cortes y/o terraplenes que necesitan atención inmediata (inestabilidad alta), los que necesitan contemplar un mantenimiento mayor al que se está ejecutando (inestabilidad media) y los que no requieren acciones diferentes a las actualmente aplicadas (inestabilidad baja). Esta primera evaluación debe ser parte de la base de datos.

Cuando se le aplica la debida corrección al problema de inestabilidad presente y ésta es satisfactoria, se debe contemplar la disminución del IGE en la siguiente evaluación. Si con el paso del tiempo, los indicadores de estabilidad varían de una forma demasiado irregular, se hace necesario revisar en la base de datos que es lo que está sucediendo, es decir, cuales son los factores que han ocasionado variabilidad. Si el problema fueran los factores analizados, la metodología tiene la cualidad de poder ser modificada. En cada corte y/o terraplén que presente irregularidades, se realizarán gráficas comparativas de todos los factores involucrados para observar cómo es que están variando en cada evaluación, y ver si los problemas recaen en errores del ingeniero evaluador o son errores puramente de los factores, como complejidad al evaluarlos o deterioros severos. La experiencia muestra que, si un factor es el causante de las irregularidades, este puede ser mitigado aisladamente, sin necesidad de aplicar un tratamiento general y más costoso que encierre a todos los factores.

CAPITULO III. FACTORES Y PROCEDIMIENTOS CALIFICATIVOS DEL INDICADOR GENERAL DE ESTABILIDAD (IGE)

El desarrollo de la Metodología de Evaluación permitirá a los departamentos de conservación y mantenimiento una clasificación de los cortes y terraplenes inestables o próximos a estarlo; este nivel de

riesgo se obtendrá mediante el Indicador General de Estabilidad (IGE), el cual se obtiene de la sumatoria de puntuaciones dadas a los factores que presentan. Para determinar los factores que evalúan la estabilidad de taludes de terraplenes y/o cortes carreteros se tomaron algunas experiencias de los departamentos de transporte de las diferentes ciudades de Estados Unidos.

La evaluación de los cortes y/o terraplenes y el riesgo que presenta, está basado en la observación directa del sitio y las características que presenta cada factor, pero es importante considerar otros factores de riesgo utilizados en otros sistemas como frecuencia/costo de mantenimiento, Tránsito Promedio Diario Anual (TDPA), Precipitación, etc. Para poder crear una base de datos; esto descrito con anterioridad.

3.1 INDICADOR GENERAL DE ESTABILIDAD DE TERRAPLENES CARRETEROS (IGE_{TC})

El cálculo del IGE_{TC} consta de seis categorías que contribuyen al riesgo de falla de un terraplén: geometría (altura del terraplén y ángulo del talud), vegetación de las caras del talud (altura y % de cobertura), obras de drenaje (escalonamiento, grietas, desgaste de la superficie, despostillamiento, fracturamiento de la estructura, separación de la cuneta con la vía, obstrucciones), erosión, asentamiento y pavimento (fisuras y grietas por fatigamiento, grietas en bloque, grietas de borde, grietas longitudinales, grietas transversales, ahuellamiento, baches).

Las categorías de evaluación fueron establecidas en base a los diferentes tipos de factores involucrados en la inestabilidad de un terraplén, ya sea directa o indirectamente. Todos los factores del Sistema de Evaluación de Riesgo para obtener el IGE_{CC} son presentados en la Tabla 3.

3.1.1 GEOMETRÍA

3.1.1.1 ANGULO DEL TALUD

Para la evaluación de este factor, un mayor ángulo tendrá una puntuación más alta, por significar mayor peligro ante la inestabilidad, se propone la siguiente puntuación:

- Riesgo Bajo (3 pts.): talud con un ángulo de 20 a 40°.
- Riesgo Medio (9 pts.): talud con un ángulo de 40 a 50°.
- Riesgo Alto (27 pts.): talud con un ángulo de 50 a 60°.
- Riesgo Muy Alto (81 pts.): talud con un ángulo > a 60°.

3.1.1.2 ALTURA DEL TERRAPLÉN

Para la evaluación, una altura muy grande traerá problemas de inestabilidad grandes (un mal procedimiento de compactación origina asentamientos severos, falla por desproporción altura-grado de talud, etc.) otorgándole una calificación mayor. Se proponen las siguientes puntuaciones:

- Riesgo Bajo (3 pts.): altura < a 5 m.
- Riesgo Medio (9 pts.): altura comprendida de 5 a 10 m.
- Riesgo Alto (27 pts.): altura comprendida de 10 a 20 m.
- Riesgo Muy Alto (81 pts.): altura > a 20 m.

3.1.2 VEGETACIÓN

La vegetación es un elemento fundamental en los aspectos de conservación de suelos, que al sustentarse sobre él ejerce con las raíces una acción de sujeción importante. Por otra parte, el porcentaje de cobertura vegetal actúa como amortiguador del agua de las lluvias, disminuyendo su capacidad erosiva antes de llegar al suelo y disminuyendo la escorrentía superficial (Suarez D.2001).

Tabla 3. Factores de riesgo para la obtención del IGE_{TC}.

No. TERRAPLEN		OBSERVACIONES.				FOTO No. _____ A _____
KM.						FECHA ____/____/____
LONGITUD (m).						
LADO						
CONDICIÓN		SECO HÚMEDO MOJADO				
FACTOR		PUNTUACION				
		3	9	27	81	
GEOMETRIA	ANGULO (°)	20 a 40°	40 a 50°	50 a 60°	> a 60°	
	ALTURA (m)	0 m. ≤ H ≤ 5 m.	5 m. ≤ H ≤ 10 m.	10 m. ≤ H ≤ 20 m.	H > a 20 m.	
VEGETACIÓN	ALTURA	< a 15 cm.	15 a 25 cm.	25 a 60 cm.	> a 60 cm.	
	% DE COBERTURA	Densa 75 a 100 %	Moderada 50 a 75%	Esparcida 25 a 50%	Descubierto 0 a 25%	
OBRAS DE DRENAJE	ESCALONAMIENTO	Ninguno	H < 6 mm.	6 mm. ≤ H ≤ 25 mm.	H > 25 mm.	
	GRIETAS	Ancho < 1 mm. ó selladas en condiciones satisfactorias	Ancho de 1 a 3 mm. ó selladas en condiciones insatisfactorias	Ancho de 3 a 10 mm. Presencia de poco material granular y vegetación.	Ancho > a 10 mm. Presencia de infiltración importante.	
	DESGASTE DE LA SUPERFICIE	Sin desgaste de agregados	Desgaste del agregado, pero no significativamente	Rugosa, pérdida de partículas mínimas. No hay socavación significativa	Muy rugosa, presenta pérdida de aprtículas. Presencia de socavación, obstrucción del fluido.	
	DESPOSTILLAMIENTO	Longitud < a 1 cm.	1 cm. ≤ Longitud ≤ 5 cm.	5 cm. ≤ Longitud ≤ 15 cm.	Longitud > a 15 cm.	
	FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	Presencia de 1 Bloque en el tablero de la cuneta.	Más de 2 bloques en el tablero de la cuneta. No hay desplazamiento ni humedecimiento del concreto. No se observa infiltración.	Los bloques presentan una separación de 1 a 3 mm. con algun desplazamiento sin humedecimiento	Separación de bloques entre si > a 3 mm. Desplazamientos, Hundimientos, Filtración excesiva del agua a capas inferiores. Remoción total o parcial del concreto, no hay continuidad en cuneta.	
	SEPARACION DE LA CUNETAS ⁶ / LA VIA	Ancho < a 1 mm.	1 mm. ≤ Ancho ≤ 3 mm.	3 mm. ≤ Ancho ≤ 10 mm.	Ancho > a 10 mm.	
	OBSTRUCCIONES	Piedras con diametro muy pequeño dispersas en la sección	< a 1% de la sección se encuentra con material tanto transportado como del que proviene de taludes adyacentes	Se encuentra obstruida hasta un 30% de la sección total.	Presenta obstrucción en más del 30% de su sección total.	
EROSION		Sin erosión	Erosión leve en talud (Laminar y/o pequeños surcos)	Erosión moderada en talud (Surcos grandes asociado con zanjas o carcavas).	Erosión severa (Zanjas o carcavas)	
ASENTAMIENTO		Ninguno	Poco evidente en la calzada	Evidente en la calzada	Muy Evidente en la calzada	
PAVIMENTO	FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO	Fisuras < a 2 mm.	fisuras de 2 a 3 mm. Poca conexión entre ellas.	Patrón de poligonos pequeños y angulosos, aberturas de 1 a 3 mm.	Malla cerrada de poligonos, abertura > a 3 mm. bloques sueltos, llegando a formar baches.	
	GRIETAS EN BLOQUE	Ancho de abertura < 1 mm o aberturas selladas con material de sello en condiciones satisfactorias.	Bloques con fisuras de 1 a 3 mm. de ancho. Aberturas selladas con material de sello insatisfactorio.	Bloques definidos fisuras de 3 a 10 mm. despostillamiento menor en bordes.	Bloques bien definidos, fisuras > a 10 mm. Severo despostillamiento en bordes.	
	GRIETAS DE BORDE	Inicio de grieta, fisuras muy finas en borde de calzada.	Grietas sin ruptura. Tramo < a 3% de la long. de la porción afectada.	Grietas c/desintegraciones y perdida de material en tramo de 3 al 10% de la long. de porción afectada.	Grietas con ruptura considerable y perdida del material en tramo > al 10% de la long. de porción afectada.	
	GRIETAS LONGITUDINALES	Abertura de fisura < a 1 mm. Aberturas selladas en condiciones satisfactorias. No hay filtración de agua.	Abertura de fisura de 1 a 3 mm. Aberturas selladas en condiciones insatisfactorias.	Abertura de grieta de 3 a 10 mm. fisuras en bordes, filtración de agua.	Abertura de grieta > a 10 mm. fisuras en bordes c/severidad media o alta	
	GRIETAS TRANSVERSALES	Abertura de fisura < a 1 mm. Aberturas selladas en condiciones satisfactorias. No hay filtración de agua.	Abertura de fisura de 1 a 3 mm. Aberturas selladas en condiciones insatisfactorias.	Abertura de grieta de 3 a 10 mm. fisuras en bordes, filtración de agua.	Abertura de grieta > a 10 mm. fisuras en bordes c/severidad media o alta	
	AHUELLAMIENTO (RODERAS)	Profundidad < a 5 mm.	5 mm. ≤ Profundidad ≤ 15 mm.	15 mm. ≤ Profundidad ≤ 25 mm.	Profundidad > a 25 mm.	
	BACHES	Profundidad < a 10 mm. Sin desprendimientos superficiales.	10 mm. ≤ Profundidad ≤ 25 mm. Desprendimientos superficiales, capas deslgadas.	25 mm. ≤ Profundidad ≤ 50 mm. Exposición de la base.	Profundidad > a 50 mm. Afectación de la base granular	

No se puede considerar la presencia o ausencia de vegetación en un área como el factor condicionante por tratarse de un elemento protector del suelo y condicionante del comportamiento hidrológico. En consecuencia, es de interés para la evaluación IGE_{TC} (Índice de Gestión de Estabilidad de Terraplenes) conocer que altura de vegetación existe y cuál es el porcentaje cubierto en la zona.

3.1.2.1 ALTURA

Para la evaluación de este factor, una mayor altura de vegetación tendrá una puntuación más alta, debido al impacto producido por las gotas de lluvia. Se propone la siguiente puntuación:

- Riesgo bajo (3 pts.): altura de la vegetación < a 15 cm.
- Riesgo medio (9 pts.): altura de la vegetación de 15 a 30 cm.
- Riesgo alto: altura de la vegetación de 30 a 60 cm.
- Riesgo muy alto: altura de la vegetación.

3.1.2.2 COBERTURA DE LA VEGETACIÓN.

Para poder determinar los rangos que se utilizan en la puntuación de este factor se debe de evaluar el grado de cobertura vegetal, el cual determina la superficie de suelo que queda protegida contra el impacto directo de la lluvia. La máxima protección es proporcionada por una cubierta mayor o igual al 75% de la superficie total y por ende, la mínima protección será cuando la vegetación sea escasa o nula.

En base a esto, se establecen las siguientes puntuaciones:

- Riesgo bajo (3 pts.): Vegetación densa, talud cubierto del 75 a 100 %.
- Riesgo medio (9 pts.): Vegetación moderada, talud cubierto del 50 a 75%.
- Riesgo alto (27 pts.): Vegetación Esparcida, talud cubierto del 25 a 50%.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Vegetación descubierta, talud cubierto del 0 a 25%.

3.1.3 OBRAS DE DRENAJE

Es el conjunto de obras que permite un manejo adecuado de los fluidos, para lo cual es indispensable considerar los procesos de captación, conducción y evaluación de los mismos. Las obras de drenaje pueden clasificarse en obras para el control de aguas superficiales (que actúan directamente sobre la carretera; se clasifican en longitudinales y transversales) y obras para el manejo de flujos subterráneos o superficiales (para el control de erosión que resultan ser importantes en la estabilidad de ésta).

3.1.3.1 DRENAJE LONGITUDINAL

Su sección transversal es variable según lo determine el diseño (triangular, trapezoidal y cuadrada), siendo la más común, la de forma triangular. A continuación, se mencionan los daños más comunes en cunetas, así como la forma de registro para su evaluación del IGE; tomando en consideración el criterio personal.

3.1.3.1.1 ESCALONAMIENTO.

Se establecen las siguientes puntuaciones:

- Riesgo bajo (3 pts.): Sin ningún problema de escalonamiento.
- Riesgo medio (9 pts.): Separación < 6 mm.
- Riesgo alto (27 pts.): 6 mm.< separación < 25 mm.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Separación > 25 mm.

3.1.3.1.2 GRIETAS

En la evaluación, se tomará en cuenta la abertura de la grieta y la severidad que presente; proponiendo así, las siguientes puntuaciones:

- Riesgo bajo (3 pts.): Fisuras selladas que no permitan infiltración de agua fácilmente.
- Riesgo medio (9 pts.): Grietas < 3 mm.
- Riesgo alto (27 pts.): Grietas de 3 a 10 mm; se puede observar la presencia de material granular tipo arena y alguna presencia de vegetación.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Grietas > 10 mm.; se observa un potencial de infiltración importante con material granular y presencia o no de vegetación.

3.1.3.1.3 DESGASTE DE LA SUPERFICIE.

Se proponen los siguientes niveles de puntuación:

- Riesgo bajo (3 pts.): Sin desgaste del recubrimiento.
- Riesgo medio (9 pts.): Se ha perdido recubrimiento del agregado que ha comenzado a desgastarse, pero no de manera significativa.
- Riesgo alto (27 pts.): La superficie del concreto es moderadamente rugosa y hay pérdida leve de partículas, sin embargo, no se observa socavación significativa.
- Riesgo muy alto (81 pts.): La superficie está muy rugosa y presenta pérdida de partículas, puede presentarse socavación que genera un canal más pequeño por donde pasa el flujo.

3.1.3.1.4 DESPOSTILLAMIENTO

Se proponen los niveles de puntuación:

- Riesgo bajo (3 pts.): Distancia < a 1 cm.
- Riesgo medio (9 pts.): Distancia de 1 a 5 cm.
- Riesgo alto (27 pts.): Distancia de 5 a 15 cm.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Distancia > a 15 cm.

3.1.3.1.5 FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA.

Con base en su nivel de severidad, se propone los niveles de puntuación:

- Riesgo bajo (3 pts.): Presencia de solo un bloque en el tablero de la cuneta; mínima infiltración.
- Riesgo medio (9 pts.): Existen más de dos bloques en el tablero de la cuneta sin embargo no hay desplazamientos ni hundimientos del concreto y no se observa infiltración excesiva.
- Riesgo Alto (27 pts.): Los bloques presentan una separación entre 3 mm. y 10 mm. con algún desplazamiento; sin hundimientos.

- Riesgo muy alto (81 pts.): Los bloques presentan separaciones entre sí mayores de 10 mm. adicionalmente hay desplazamientos y hundimientos que permiten infiltración de agua a las capas inferiores. Puede existir remoción total o parcial del concreto y no hay continuidad en la cuneta.

3.1.3.1.6 SEPARACIÓN DE LA CUNETA CON LA VÍA

De acuerdo a la distancia de separación con la vía y la severidad que presente, se propone los niveles de puntuación:

- Riesgo bajo (3 pts.): Separación < a 1 mm.
- Riesgo medio (9 pts.): Separación de 1 a 3 mm.
- Riesgo alto (27 pts.): Separación de 3 a 10 mm.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Separación > a 10 mm.

3.1.3.1.7 OBSTRUCCIONES

En base a la observación e identificar la presencia de obstrucciones en la estructura, se propone los siguientes niveles de puntuación:

- Riesgo bajo (3 pts.): Piedras con diámetro muy pequeño dispersas en la sección.
- Riesgo medio (9 pts.): Menos del 1% de la sección se encuentra con material tanto transportado como del que proviene de taludes adyacentes.
- Riesgo alto (27 pts.): La cuenta se encuentra obstruida en un 30% de su sección transversal.
- Riesgo muy alto (81 pts.): La cuneta presenta obstrucción en más del 30% de su sección transversal.

3.1.3.2 DRENAJE TRANSVERSAL

Son estructuras de evacuación de las aguas de escorrentía y su función es la de drenar corrientes de agua permanentes o estacionales. Se consideran aquí las alcantarillas en donde el agua fluye con una superficie libre por la tubería. Los tipos de daño son Grietas en aleros, muro cabezal y lavaderos, Grietas verticales en la unión entre el muro cabezal y los aleros, Fractura con pérdida parcial o total de la tubería, Separación de secciones de tubería permitiendo infiltración de agua, Hundimientos o aplastamientos de secciones de tubería, Socavación del concreto y terreno natural de aleros y/o salida de tubería en muro cabezal.

3.1.4 EROSIÓN.

En base a las características de la erosión que se presenta en el talud de terraplén y la severidad que estos originan, conllevando a una inestabilidad; se proponen los siguientes parámetros de puntuación:

- Riesgo Bajo (3 pts.): Sin presencia de erosión.
- Riesgo medio (9 pts.): Erosión leve en el talud (erosión laminar y/o pequeños surcos).

- Riesgo alto (27 pts.): Erosión moderada en el talud (surcos grandes asociado con zanjas o cárcavas).
- Riesgo muy alto (81 pts.): Erosión severa (presencia de zanjas o cárcavas).

3.1.5 ASENTAMIENTO

Para evaluarlos, se tomará en cuenta la peligrosidad que presenta la visualización del asentamiento:

- Riesgo bajo (3 pts.): Ninguna evidencia de asentamiento.
- Riesgo medio (9 pts.): Asentamiento poco evidente en la calzada.
- Riesgo alto (27 pts.): Asentamiento evidente en la calzada.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Asentamiento muy evidente en la calzada.

3.1.6 FALLAS EN EL PAVIMENTO

Los daños más comunes que se presentan en la estructura del pavimento flexible, así como su severidad, causas de origen y forma de evaluarlos se presentan a continuación de acuerdo a los estudios realizados por el Departamento de Transporte de Washington (WSDOT) conjunto con la Federal Highway Administration (FHWA). Estos son indicadores de que la estructura del pavimento presenta algún problema.

3.1.6.1 FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO

Se proponen los siguientes niveles de puntuación:

- Riesgo bajo (3 pts.): Serie de fisuras longitudinales paralelas muy finas (con aberturas menor a 2 mm), que no presentan despostillamiento, ninguna conexión entre ellas y no existe evidencia de bombeo.
- Riesgo medio (9 pts.): Serie de fisuras longitudinales paralelas (aberturas de 2 a 3 mm), principalmente en la huella, que no presentan despostillamiento, con poca conexión entre ellas y no existe evidencia de bombeo.
- Riesgo alto (27 pts.): Las fisuras formaron un patrón de polígonos pequeños y angulosos, que tiene un ligero desgaste en los bordes y aberturas de 1 a 3 mm, sin evidencia de bombeo.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Las fisuras han progresado a manera de constituir una malla cerrada de polígonos (abertura > a 3 mm.) con despostillamiento en los bordes y los bloques se encuentran sueltos y ser removidos ante el tránsito formando baches. Presencia de bombeo.

3.1.6.2 FISURAS Y GRIETAS EN BLOQUE.

Se propone los siguientes niveles de puntuación:

- Riesgo bajo (3 pts.): Formación de bloques, no claramente definidos con un ancho de abertura < a 1 mm, o aberturas selladas con material de sello en condiciones satisfactorias que no permiten la filtración de agua.

- Riesgo medio (9 pts.): Bloques con fisuras de 1 a 3 mm de ancho, con principio de despostillamiento en los bordes. O aberturas selladas con el material de sello en condiciones insatisfactorias.
- Riesgo alto (27 pts.): Bloques definidos con fisuras de 3 a 10 mm. de ancho, despostillamiento menor en los bordes.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Bloques bien definidos por fisuras > a 10 mm. de ancho, con presencia de severo despostillamiento en los bordes.

3.1.6.3 GRIETAS DE BORDE

Se propone los siguientes niveles de puntuación:

- Bajo (3 puntos): inicio de grieta, fisuras muy finas en el borde de la calzada.
- Medio (9 puntos): Grietas sin ruptura o pérdida de material en un tramo < del 3% de la longitud de la porción afectada del pavimento.
- Alta (27 puntos): Grietas con algunas desintegraciones y pérdida de material en un tramo del 3 al 10% de la longitud de la porción afectada del pavimento.
- Muy Alta (81 puntos): Grietas con ruptura considerable y pérdida de material en un tramo > del 10 % de la longitud de la porción afectada del pavimento.

3.1.6.4 GRIETAS LONGITUDINALES

En relación a las posibles causas que lo originan, la severidad y el riesgo que estás presentan, se propone los siguientes niveles de puntuación:

- Bajo (3 puntos): Abertura de la fisura < a 1 mm, o aberturas selladas con material de sello en condiciones satisfactorias que no permiten la filtración de agua.
- Medio (9 puntos): Abertura de la fisura de 1 a 3 mm o aberturas selladas con el material de sello en condiciones insatisfactorias.
- Alto (27 puntos): Abertura de la grieta de 3 a 10 mm, pueden existir algunas fisuras con patrones irregulares de severidad baja en los bordes o cerca de ellos; existe una alta probabilidad de infiltración del agua a través de ella.
- Muy Alto (81 puntos): Abertura de la grieta > a 10 mm. y fisuras con patrones irregulares de severidad media o alta en los bordes o cerca de ellos.

3.1.6.5 GRIETAS TRANSVERSALES

En relación a las posibles causas que lo originan, la severidad y el riesgo que estás presentan, se propone los siguientes niveles de puntuación:

- Bajo (3 puntos): Abertura de la fisura < a 1 mm, o aberturas selladas con material de sello en condiciones satisfactorias que no permiten la filtración de agua.
- Medio (9 puntos): Abertura de la fisura de 1 a 3 mm o aberturas selladas con el material de sello en condiciones insatisfactorias.

- Alto (27 puntos): Abertura de la grieta de 3 a 10 mm, pueden existir algunas fisuras con patrones irregulares de severidad baja en los bordes o cerca de ellos; existe una alta probabilidad de infiltración del agua a través de ella.
- Muy Alto (81 puntos): Abertura de la grieta > a 10 mm. y fisuras con patrones irregulares de severidad media o alta en los bordes o cerca de ellos.

3.1.6.6 AHUPELLAMIENTO (RODERAS)

En relación a las posibles causas que lo originan, la severidad y el riesgo que estás presentan, se propone los siguientes niveles de puntuación:

- Bajo (3 puntos): profundidad < a 5 mm.
- Medio (9 puntos): profundidad de 5 a 15 mm.
- Alto (27 puntos): profundidad de 15 a 25 mm.
- Muy alto (81 puntos): profundidad > a 25 mm.

3.1.6.7 BACHES

En relación a las posibles causas que lo originan, la severidad y el riesgo que estás presentan, se propone los siguientes niveles de puntuación:

- Bajo (3 puntos): profundidad de afectación < 10 mm, sin desprendimientos superficiales.
- Medio (9 puntos): profundidad de 10 a 25 mm, corresponde al desprendimiento de tratamientos superficiales o capas delgadas.
- Alto (27 puntos): profundidad de afectación de 25 a 50 mm, deja expuesta la base.
- Muy Alto (81 puntos): profundidad de afectación > a 50 mm, llegando afectar la base granular.

3.2 INDICADOR GENERAL DE ESTABILIDAD PARA CORTES CARRETEROS (IGE_{CC})

El cálculo del IGE_{CC} consta de tres categorías que contribuyen al riesgo de falla de rocas: Características del talud (altura del talud, mantenimiento/limpieza, ángulo del talud, irregularidades, tipo de sección, área de captación y vegetación), Clima (precipitación media anual e infiltración/agua presente) y Geología (rocas sedimentarias, rocas, bloques en una matriz de suelo, suelos residuales).

Las categorías de evaluación fueron establecidas pensando en los diferentes tipos de materiales que pueden encontrarse en el campo y que suelen ser los más representativos de los desastres que a menudo ocurren. Todos los factores del Sistema de Evaluación de Riesgo para obtener el IGE_{CC} son presentados en la Tabla 4.

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL TALUD

Con frecuencia las propias manipulaciones del ingeniero pueden ser fuente de graves problemas de estabilidad de taludes. Los cortes practicados son el principal problema en las vías carreteras, ya que se modifican las condiciones de estabilidad de las laderas naturales afectando factores de importancia como la altura, inclinación y la superficie.

3.2.1.1 ALTURA DEL TALUD

Si el corte es alto y largo, tendrá una mayor masa de suelo o rocas con riesgo de caerse. Cuanto mayor sea dicha masa, mayor será el riesgo de que se produzca el desprendimiento. A mayor cantidad de suelo y rocas, mayor riesgo de desprendimiento y mayores desperfectos. Los materiales caídos de cortes más altos tienen una mayor energía potencial que los materiales en cortes pequeños, lo que representa un mayor riesgo y por lo tanto reciben una puntuación mayor.

La altura es medida desde la superficie de rodadura de la carretera hasta punto más alto en el cual los desastres son esperados. Si hay un riesgo en el talud más allá del corte, la altura total del talud es medida. Si sólo se pretende evaluar el corte, la máxima altura del corte es considerada. Si el corte ya no se diferenciara, se deberá tomar la máxima altura de los peligros presentes. Para poder medir la altura en una forma práctica, se recomienda el uso de un clinómetro.

3.2.1.2 MANTENIMIENTO/LIMPIEZA.

En el mantenimiento de los taludes de corte existe una situación que se debe de analizar detalladamente; es la frecuencia con que se levantan escombros y se da el mantenimiento adecuado de la carretera y lo exhaustivo de estas tareas. El realizar muchas actividades de limpieza durante el año, es un indicativo de que algo está mal con los taludes de corte, y muchas actividades de limpieza se hacen caras y engorrosas comparadas con un solo tratamiento mayor; y lo más importante, es una advertencia de falla que genera riesgo a los usuarios. Está basado en la experiencia histórica que se tenga. El ingeniero encargado de evaluar a los cortes en campo deberá tener un conocimiento y juicio aptos, pues algunos sitios tan solo requerirán de un barrido hacia la orilla fuera de la carretera; mientras que otros requerirán de carga y acarreo. Los sitios de corte que requieran menos acciones en un lapso de tiempo largo tendrán una puntuación baja y los que necesiten más acciones en un tiempo relativamente corto, recibirán una puntuación más alta. La evaluación de este factor se realiza mediante la Tabla 4 “frecuencia de mantenimiento vs acciones de limpieza”

Tabla 4. Riesgo del corte. Mantenimiento/Limpieza

FRECUENCIA DE MANTENIMIENTO	LIMPIEZA			
	Menor Barrido de escombros, limpieza de cunetas	Moderado Algunas cargas y acarreo	Mayor Cargas y acarreo significantes	Trabajo extenso
No tan frecuente	Menor	Menor	Menor	Moderado
Anualmente (1 vez por año)	Menor	Menor	Moderado	Alto
Estacional (1 a 3 veces por año)	Menor	Moderado	Alto	Muy alto
Más de 3 veces por año	Moderado	Alto	Muy alto	Muy alto

Tabla 4.- Factores de riesgo para la obtención del IGE_{cc}.

CATEGORÍA	FACTORES	PUNTUACIONES					
		3	9	27	81		
Características del talud	Altura	0 a 5 m	5 m a 10 m	>10 m a 20 m	> 20 m		
	Mantenimiento/limpieza	Menor	Moderado	Alto	Muy alto		
	ángulo	Suelo	< 30°	30° ≤ ángulo ≤ 40°	40° ≤ ángulo ≤ 60°	> 60°	
		Roca	Categoría < 2	2 ≤ categoría ≤ 4	4 ≤ categoría ≤ 8	Categoría > 8	
	Irregularidades	Ninguna	Menor	Moderada	Mayor		
	Tipo de sección del corte	Cajón	Cajón con fallas en pav.	Balcón	Balcón con fallas en pav.		
	Área de captación de caídos	Clase 1. 95 % al 100 %	Clase 2. 65 % al 94 %	Clase 3. 30 % al 64 %	Clase 4. < 30 %		
	Veget.	Cuerpo	Poblado/arbustivo	Poblado/herbáceo	Semidesnudo/herbáceo	Desnudo	
Corona		Poblado/arbóreo	Poblado/arbustivo, semidesnudo/arbóreo	Poblado/herbáceo, Semidesnudo/arbustivo	Desnudo, semidesnudo/herbáceo		
Clima	Precipitación media anual (mm)	≤ 200	200 < precipitación ≤ 500	500 < precipitación ≤ 850	> 850		
	Infiltración/agua presente	Sin humedad	Húmedo/mojado	Goteando	Agua escurriendo		
Geología	Rocas Sedimentarias	Socavación en el pie de cada capa	0 a 0.3	0.3 a 0.6	0.6 a 1.5	> 1.5	
		Grado de interstratificación	1 a 2 interstratos débiles < 15 cm	1 a 2 interstratos débiles > 15 cm	Más de 2 interstratos débiles < 15 cm	Más de 2 interstratos débiles > 15 cm	
		Formación de canales	Profundidad ≤ 5 cm	5 cm < profundidad ≤ 10 cm	10 cm < profundidad ≤ 20 cm	Profundidad > 20 cm	
	Ancho ≤ 2 cm		2 cm < ancho ≤ 5 cm	5 cm < ancho ≤ 10 cm	ancho > 10 cm		
	Muy separados		Muy continuos	Muy continuos	Muy continuos		
	Roca cristalina	Tipo de roca	Homogéneo/macizo	Pequeñas fallas/venas fuertes	Esquistos/zona de cizallamiento < 15 cm	Pegmatitas débiles/micas/zona de cizallamiento > 15 cm	
		Grado de salientes	0 a 0.30	0.30 a 0.60	0.60 a 1.20	> 1.20	
		Grado de erosión	Reciente	Desgastado/decolorado	Ligeramente alterado/atenuado	Alterado	
		Discontinuidades	Tamaño de bloques (m)/volumen (m ³)	< 0.30 / < 0.5	0.30 a 0.60 / < 0.5 a 2	0.60 a 1.50 / < 2 a 6	> 1.50 / > 6
			Grupo de discontinuidades	1	1 aleatorio	2	> 2
			Persistencia/orientación	< 3 m/buzamiento hacia adentro del talud	> 3 m/buzamiento hacia adentro del talud	< 3 m/orientación hacia la carretera	> 3m/orientación hacia la carretera
			Abertura (mm)	Cerradas	0.1 a 1	1 a 5	> 5
			Condiciones de erosión	Reciente	Desgastado/decolorado	Aberturas llenas de material granular	Aberturas llenas de material arcilloso
	Fricción	Rugosa	Ondulada	Planar	Planar lisa		
	Bloques en matriz	Tamaño del bloque (m)	< 0.30	0.30 a 0.60	0.60 a 1.50	> 1.50	
		Forma del bloque	Tabulares	Cúbicos	Cúbicos angulares	Redondas lisas/planas con inclinación hacia la vía	
		Deslizamientos/desplazamientos	Agrietamientos en la corona del talud	Agrietamientos y hundimientos notables	Acumulación del material en el pie del talud	Deformación en forma de gradas	
	Suelos residuales	Perfil de meteorización	Horizonte B-C	Horizonte B	Horizonte A-B	Horizonte A	
Escurrimiento superficial		Formación de torrentes pequeños	Menos de 1/2 corte presenta torrentes y canales	Más de 1/2 corte presenta torrentes y canales	Desprendimientos y concentración de sólidos de arrastre en el pie		
Contacto suelo sobre roca		Presencia de rocas fracturadas en menos de la cuarta parte del talud	Salientes de roca cúbica con tamaños de 30 a 60 cm	Rocas con superficie de fricción onduladas	Rocas con superficie de fricción planar lisa		

3.2.1.3 ÁNGULO DEL TALUD

Lo que se puede hacer para identificar las fallas en corte, está ligado a los cambios en la apariencia geométrica. La forma en que los materiales productos de un derrumbe caen dentro de la carretera depende en gran parte de la inclinación que el talud presente y del tipo de material que se tenga. Para poder evaluar este factor se hace la diferencia entre suelo y roca.

La medición del ángulo del talud no solo se debe de realizar para dar una puntuación en ese momento, sino se debe tener en claro que también se necesita para archivarlo como base de datos, ya que la inclinación del corte puede variar con el tiempo debido a las posibles fallas que se presenten. Si en cada levantamiento del mismo corte, en tiempos diferentes, se presenta variación en el ángulo de inclinación, es prueba contundente de un riesgo presente.

3.2.1.3.1 ÁNGULO DE TALUD EN SUELOS

Se basa en el deslizamiento y la rapidez con que una masa de suelo llegará a la vía, y no en el área de captación que presente. Por ello, es bueno estar consciente de los riesgos de tener un corte con poca inclinación (demasiado tendido) que puede captar mayor cantidad de agua y saturar el suelo; aunque esta situación no es relevante, puesto que esto queda cubierto con la evaluación de factores como la precipitación, la infiltración y la erosión.

Un corte con mayor ángulo tendrá una puntuación más alta, por representar mayor peligro ante el desprendimiento de una masa de suelo, puesto que a mayor inclinación mayor es la rapidez con que se desplazará hacia la carretera.

3.2.1.3.2 ÁNGULO DE TALUD EN FORMACIONES ROCOSAS

El ángulo del talud en los cortes con formaciones rocosas es usado para determinar las consecuencias de que una roca caiga rebotando hacia la carretera, directamente dentro de la cuneta o pueda bajar por el corte con bastante energía para alcanzar la vía. El Departamento de Transporte de Missouri, E.U. usando el programa de simulación de fallas de Colorado, E.U., (CRSP, Colorado Rockfall Simulation) ha encontrado que las rocas grandes que bajan rodando de taludes con ángulos de 30° son más probables de alcanzar la carretera y las rocas pequeñas que se desprenden de los cortes casi verticales de alrededor de 85° son más probables de ir rebotando sobre la cara del corte para parar en la carretera.

Las rocas que caen de taludes menores a 30° no logran generar el suficiente momento para alcanzar la carretera, así como las rocas originadas por los cortes verticales que caen dentro de las cunetas. La puntuación aumenta conforme el ángulo del talud decrece de 70° a 30°, debido a que las rocas mayores tienen más probabilidades de rodar y adquirir bastante momento horizontal para alcanzar la carretera (Figura 1). *Russell Christopher P., et.al. (2008).*

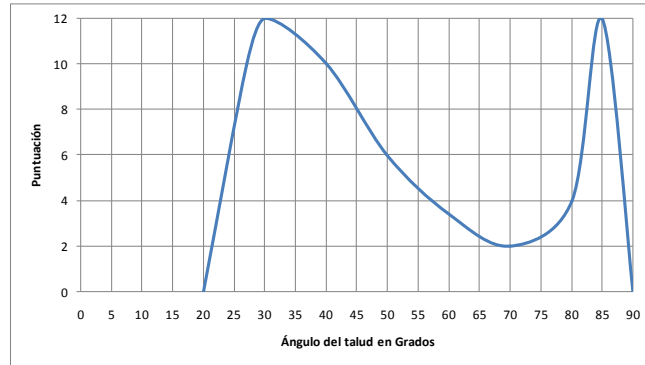


Figura 1. Puntuación para caídas de roca. *Russell Christopher P., et al. (2008)*

3.2.1.4 IRREGULARIDADES EN LA CARA DEL CORTE

Las irregularidades en el corte pueden ser a causa de técnicas pobres en el método de excavación (por ejemplo, el mal uso de los explosivos) o por un deterioro (erosión). El reconocimiento de las futuras fallas se ha hecho con base en un juicio experimental que interpreta las irregularidades sobre el corte, dentro del marco de una experiencia precedente. Es de vital importancia poder diferenciar el nivel de irregularidad de una roca cristalina y la de un suelo. Debido a que las rocas tendrán una apariencia más desastrosa; es necesario tener un juicio para compensar el criterio de puntuación, por ejemplo; en un corte de roca cristalina, no se puede esperar una apariencia lisa o plana como en la de un suelo. La irregularidad en la cara del corte se evalúa de la siguiente forma descrita:

1. Ninguna. Indica una superficie relativamente plana o alisada, con pequeñas o ningunas variaciones topográficas en toda su longitud.
2. Menor. Indica un perfil del corte con pocas variaciones en los materiales y en la topografía, que podrían causar desprendimientos, así como formaciones de pequeños cúmulos de roca menores a 60 cm de longitud o algunas rocas dispersas en la cara del talud.
3. Moderada. Indica un perfil del corte con severas variaciones en los materiales y en la topografía que podrían causar desprendimientos, así como la presencia de deformaciones en forma de cúmulos de roca que van de 0.60 m a 2 m de longitud sobre la cara del talud.
4. Mayor. Indica una irregularidad alta en el perfil del corte con grandes afloramientos de roca o grandes deformaciones en forma de escalones que se extienden a más de 2 m de longitud de la superficie del talud.

3.2.1.5 TIPO DE SECCIÓN TRANSVERSAL

Es de suma importancia tomar en cuenta el tipo de sección transversal que se presenta en la carretera, puesto que en muchas ocasiones la forma del corte tendrá gran influencia en su estabilidad. De acuerdo con las observaciones de campo, se ha observado que las vías con una sección tipo balcón son más susceptibles a deslizamientos de los cortes y a mostrar diversas fallas en la superficie de rodamiento. Bastará con observar el entorno de la carretera para decidir qué tipo de sección se presenta, así como localizar fallas en la superficie de rodadura para poder emitir una puntuación para este factor de riesgo en base a lo siguiente:

- Riesgo bajo (3 pts.): Sección tipo cajón sin fallas en la superficie de rodadura.
- Riesgo Medio (9 pts.): Sección tipo cajón con fallas en la superficie de rodadura.
- Riesgo Alto (27 pts.): Sección tipo balcón sin fallas en la superficie de rodadura.
- Riesgo muy Alto (81 pts.): Sección tipo cajón con fallas en la superficie de rodadura.

3.2.1.6 ÁREA DE CAPTACIÓN.

El área de captación se define como el espacio que permite reducir el riesgo de que los materiales fallados del corte lleguen a la carretera y es medida entre el pie del talud y el hombro de la carretera. En 1963, realizando experimentos de rodamiento de rocas (Figura 2), Ritchie junto con el Departamento de Transporte del estado de Washington (WSDOT) propuso un criterio de diseño para el área de captación basado en la altura y ángulo del talud. Debido a que los rangos de Ritchie resultaron ser muy conservadores, en 1986 fueron modificados por Whiteside (Figura 3).

En México es muy raro que las carreteras se diseñen con un área de captación suficiente para retener el material caído, la mayoría de las vías apenas tienen el espacio para construir una simple cuneta. En la evaluación de este factor se le da prioridad al caído de rocas, pues es el evento que ocurre con más frecuencia.

Si se presenta un corte conformado en su mayoría por suelo, se tomarán los mismos criterios. Para poder evaluar los cortes, el espacio de captación que se tiene actualmente se compara con el área ideal propuesta Whiteside. Las dimensiones en campo pueden ser medidas utilizando cinta métrica.

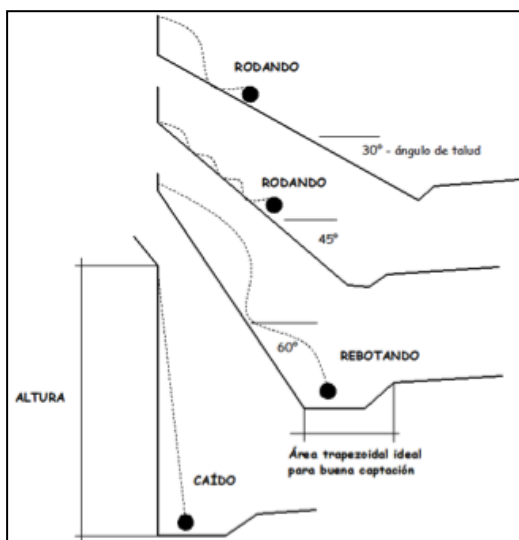


Figura 2.- Forma de caer de las Rocas.
Hoek Evert (2000)

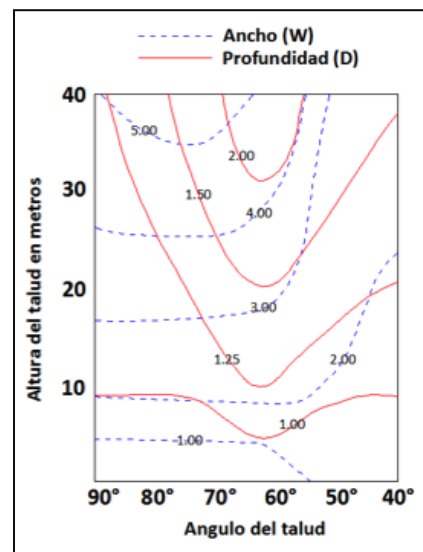


Figura 3.- Criterio de Whiteside (1986) para el diseño del área de captación de caídos de roca.

Para poder comparar las dimensiones del área de captación medida en campo con los valores propuestos por Whiteside (Russell Christopher P., et al., 2008) se recomienda utilizar un porcentaje de efectividad calculado con la siguiente ecuación:

$$\text{Efectividad} = \frac{Da + Wa}{Dr + Wr} \times 100\%$$

Donde:

La efectividad es el valor de satisfacción de las actuales dimensiones comparadas con las dimensiones ideales propuestas por Whiteside. Expresada en porcentaje. De acuerdo al porcentaje de efectividad, será la puntuación otorgada al concepto de área de captación.

Da = Profundidad medida en campo

Wa = Ancho medido en campo

Dr = Profundidad propuesta por Ritchie-Whiteside (Figura 4)

Wr = Ancho propuesto por Ritchie-Whiteside (Figura 4)

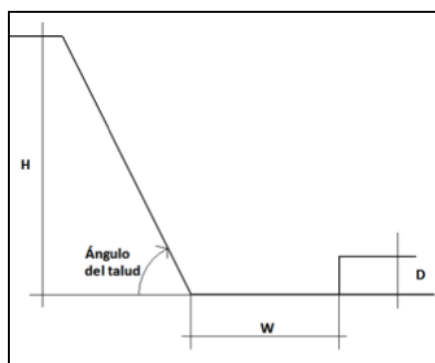


Figura 4.- Nomenclatura para el dimensionamiento del área de captación (cunetones).

Para poder evaluar la efectividad encontrada utilizamos los rangos de evaluación propuestos en base a la experiencia del Departamento de Transporte de Colorado, por lo tanto, para las efectividades de menor a 30 %, de 30 % a 64 %, de 64 % a 94 % y de 95 % a 100 %; las puntuaciones son de 81, 27, 9 y 3 respectivamente. Las puntuaciones se pueden evaluar gráficamente como se muestra en la Figura 5.

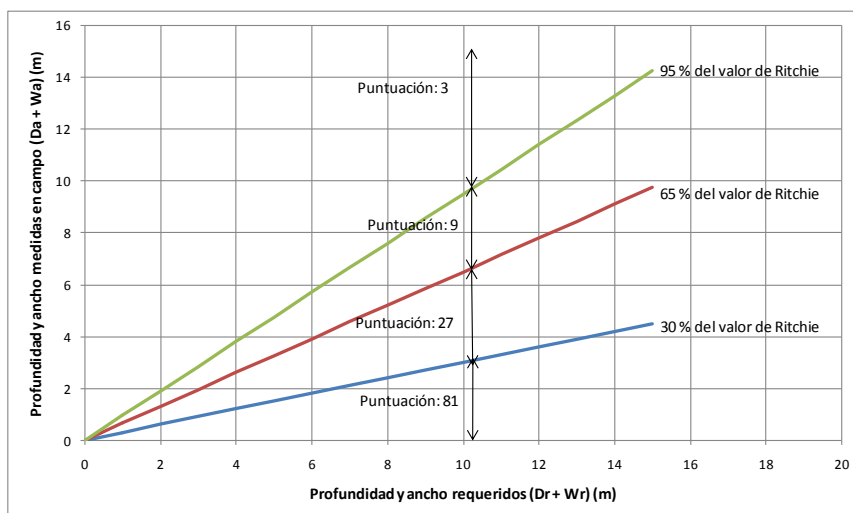


Figura 5.- Dimensiones medidas en campo vs dimensiones ideales, con sus respectivas puntuaciones.

3.2.1.7 VEGETACIÓN

El follaje de la vegetación intercepta la lluvia impidiendo el impacto directo sobre el suelo y amortiguando la energía de las gotas. La retención de agua en el follaje demora o modifica el ciclo hidrológico en el momento de una lluvia. Este fenómeno disminuye la cantidad de agua de escorrentía, disminuyendo su poder erosivo. Los árboles de mayor volumen o densidad de follaje, retrasan más el ciclo hidrológico en razón a que retienen por mayor tiempo las gotas de lluvia.

Las raíces absorben humedad del suelo, la cual es transmitida a la atmósfera por evapotranspiración. Su efecto es una disminución de la humedad en el suelo. Cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo, tiene un determinado potencial de evapotranspiración y se obtiene generalmente, una humedad de equilibrio dependiendo de la disponibilidad de agua lluvia y nivel freático.

Debido a que la vegetación es un sistema de protección para el suelo, se le considera importante para poder evaluar la peligrosidad de un corte al ser erosionado. Las principales cualidades de la vegetación para ser considerada dentro del cálculo del Indicador General de Estabilidad para Cortes Carreteros (IGE_{CC}) son las siguientes:

- a) Las raíces y el follaje aíslan el suelo de las fuerzas de tracción directa ocasionadas por el flujo del agua de escorrentía.
- b) Las raíces refuerzan el suelo aumentando la resistencia al corte (Fricción y Cohesión) y la resistencia a las fuerzas de erosión.
- c) Las raíces (de árboles) anclan el suelo o estratos más profundos, creando fuerzas resistentes al deslizamiento.
- d) Entre el sistema de raíces de cada árbol y los contiguos se forman efectos de arco que ayudan en la estabilidad de la masa de suelo.

- e) Las raíces forman una red densa entretejida en los primeros 30 a 50 centímetros de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio. *Suárez Díaz (2001)*.

Por lo tanto, queda claro que los rangos de evaluación para este factor se dan considerando un corte más susceptible a la erosión y al deslizamiento cuanto más desnudo sea este. Al realizar un corte en una ladera natural, la vegetación será diferente entre el cuerpo del talud y la corona del mismo. Una vegetación de dimensiones mayores estará presente en la parte superior, mientras que la cara estará cubierta de vegetación más fina e incluso hasta totalmente descubierta. Por ello, se evaluará en dos partes a la vegetación del corte:

Vegetación en el cuerpo del talud.

- Riesgo bajo (3 pts.). Poblado/arbustivo
- Riesgo medio (9 pts.). Poblado/herbáceo
- Riesgo alto (27 pts.). Semidesnudo/herbáceo
- Riesgo muy alto (81 pts.). Desnudo.

Vegetación en la corona del talud.

- Riesgo bajo (3 pts.). Poblado/arbóreo
- Riesgo medio (9 pts.). Poblado/arbustivo, semidesnudo/arbóreo
- Riesgo alto (27 pts.). Poblado/herbáceo, semidesnudo/arbustivo
- Riesgo muy alto (81 pts.). Desnudo, semidesnudo/herbáceo

3.2.2 CLIMA

Esta categoría tiene una estrecha relación con los problemas que puede representar la presencia de agua en el talud. De acuerdo al ciclo hidrológico el agua se mantiene en continuo movimiento y se puede presentar en una serie de eventos que incluye las nubes o vapor de agua, la precipitación en forma de lluvia, granizo o nieve, la infiltración, la evapotranspiración y la escorrentía entre otras.

3.2.2.1 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL O PRECIPITACIÓN NORMAL

Los rangos de precipitaciones anuales para poder evaluar a este factor están basados en las estadísticas de las lluvias ocurridas en México en el periodo de 1971-2000 que fueron de 760 milímetros. Los valores “normales”, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) corresponden a los promedios calculados para un periodo uniforme y relativamente largo, el cual debe tener como mínimo 30 años. Es importante señalar que la distribución mensual de la precipitación acentúa los problemas relacionados con la disponibilidad del recurso, debido a que el 68% de la precipitación normal mensual ocurre entre los meses de junio y septiembre (Figura 5). En la mayor parte de las entidades

federativas, la precipitación ocurre predominantemente entre junio y septiembre, con excepción de Baja California y Baja California Sur, donde se presenta principalmente en el invierno.

La precipitación acumulada ocurrida en la República Mexicana del 1° de enero al 31 de diciembre del año 2008 alcanzó una lámina de 869 mm, lo cual fue 14% superior a la normal del periodo de 1971 a 2000 (760 mm). Ver Figura 6.

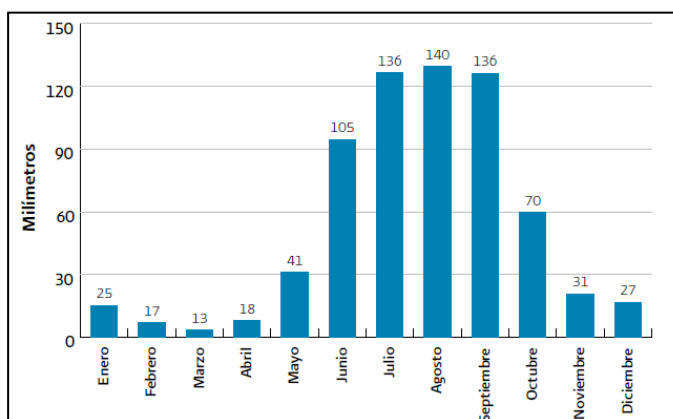
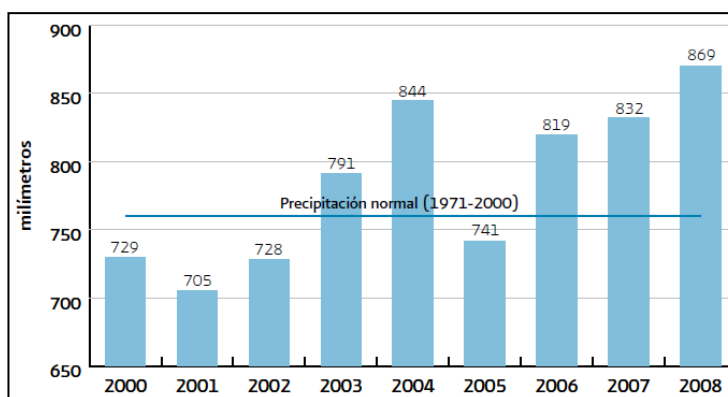


Figura 5.- Precipitación pluvial normal mensual en México, en el periodo 1971-2000 (milímetros).
CONAGUA (2010)

Figura 6.- Precipitación pluvial anual, periodo 2000-2008 (milímetros).
CONAGUA (2010)



En base a la precipitación normal nacional del periodo de 1971 a 2000 (760 mm) y las precipitaciones normales de Chiapas y Tabasco que han sido catastróficas (900 mm), así como también la precipitación del estado de Baja California sur (160 mm); se proponen los siguientes rangos de evaluación:

- Riesgo bajo (3 pts.): Precipitación normal anual \leq 200 mm.
- Riesgo medio (9 pts.): 200 mm < Precipitación normal anual \leq 500 mm.
- Riesgo alto (27 pts.): 500 mm < Precipitación normal anual \leq 850 mm.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Precipitación normal anual > 850 mm.

Congelamiento-deshielo. Esta parte de la evaluación del IGE_{CC} no es puntuación directa de campo, mas servirá para consultar los datos estadísticos que se tengan sobre las precipitaciones, es importante destacar que al tener físicamente al talud, se debe de verificar la presencia o el conocimiento de que pueda existir nieve, es decir un fenómeno de congelamiento-deshielo.

3.2.2.2 INFILTRACIÓN/AGUA PRESENTE

El agua de la lluvia al caer sobre el suelo trata de infiltrarse, desplazando el agua existente hacia abajo por macro poros, formando una especie de onda de presión de agua dentro del suelo, la cual produce un frente húmedo de infiltración. Al inicio de la lluvia la totalidad de la precipitación se infiltra humedeciendo el suelo. El agua en exceso que no puede infiltrarse se queda en la superficie. De acuerdo con la intensidad de lluvia, la infiltración y las características físicas del terreno se produce una corriente superficial (escorrentía), una serie de corrientes subterráneas semi-paralelas a la pendiente del terreno y una corriente semi-vertical de infiltración hacia el nivel freático. Estas situaciones pueden provocar fuerte inestabilidad en los taludes.

La revisión de un corte por medio de un factor que incluye al agua se hace muy difícil debido a la diferencia entre las temporadas estacionales. De forma visual es muy difícil estimar la cantidad de agua que está presente en el suelo, o el nivel de aguas freáticas, así que para la evaluación de este factor se ha establecido la apariencia de la superficie del talud. La apariencia no será la misma en los meses de lluvia que en los meses soleados. Sin embargo, con los conocimientos y experiencia del ingeniero evaluador se determinará subjetivamente evidencias de infiltración estacional como marcas de agua, vetas y zonas de descoloramiento, así como también el tipo, tamaño y color de la vegetación.

3.2.3 GEOLOGÍA

La parte más importante en cualquier estudio sobre el comportamiento de las masas de suelo es la base de datos geológicos en la cual se basan las definiciones del tipo de roca/suelo, discontinuidades estructurales y propiedades de los materiales. Por ejemplo, la orientación de una falla llena de arcilla, puede marcar la diferencia entre la estabilidad e inestabilidad en un corte carretero. Por consiguiente, tres tipos de condiciones geológicas son consideradas:

1. Roca sedimentaria. En donde la erosión diferencial tiende al control de la falla.
2. Roca cristalina. En donde la falta de homogeneidad y fracturas de la masa de rocas son condicionantes para producir la falla.
3. Rocas envueltas en suelo (rocas en matrices). Se refiere a coluviones, flujos de escombro, eólicos, glaciales, volcánicos, orgánicos, etc., en donde la erosión del material matricial y por consiguiente el desprendimiento del material granular controlan las fallas.

3.2.3.1 ROCA SEDIMENTARIA

La formación de un cuerpo sedimentario involucra ya sea el transporte de partículas al sitio de depósito por la gravedad, agua, aire, hielo o flujos masivos. La acumulación de sedimentos en su sitio es influenciada mayormente por la química, la temperatura y el carácter biológico del escenario. Los procesos de transporte y el depósito pueden ser determinados observando los estratos individuales de sedimento. El tamaño, forma y distribución de partículas proveen las pistas respecto a la forma en la cual el material fue llevado y depositado.

3.2.3.1.1 GRADO DE EROSIÓN BAJO LOS ESTRATOS DEL CORTE (DESCALCE)

Las fallas en los suelos sedimentarios son generalmente dominadas por la erosión diferencial y el desgaste de varias litologías. La cantidad de material erosionado depositado en el pie del talud refleja el grado de variación litológica dentro del corte y se ha encontrado que es lo que mayormente contribuye en afloramientos sedimentarios.

Para la evaluación de este factor se medirá la longitud de desgaste presentado en el estrato más deteriorado y se juzgará la cantidad de material que se encuentra en el pie del talud.

3.2.3.1.2 GRADO DE INTERESTRATIFICACIÓN

La severidad y tipo de las fallas ocurridas, son causadas por el grado de variación litológica y el espesor del estrato dentro del corte. De acuerdo a estas observaciones y al RHRS modificado, el grado de Interestratificación debe de incluirse, por ser un factor condicionante de las fallas. Las características principales que se consideran son: el número de interestratificaciones débiles y sus espesores correspondientes.

3.2.3.1.3 PRESENCIA DE SURCOS

La erosión en surcos ocurre cuando el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural de la superficie. Al concentrarse el flujo en pequeñas corrientes sobre una pendiente, se genera una concentración del flujo de la corriente el cual produce erosión debido a la fuerza tractiva, formándose pequeños surcos o canales, los cuales inicialmente son imperceptibles, pero poco a poco se van volviendo más profundos. En estos surcos la energía del agua en movimiento adquiere cada vez, una fuerza mayor capaz de desprender y transportar partículas de suelo. Inicialmente, los pequeños canales presentan una forma en V la cual puede pasar a forma en U. Cuando los surcos se hacen más profundos y más anchos se dice que los surcos se convirtieron en cárcavas. Si los canales de erosión tienen profundidades de menos de 30 cm. se les clasifica como surcos y si la profundidad es mayor, como cárcavas. Los surcos pueden eliminarse con rastrillado y siembra de vegetación. Las cárcavas requieren de obras más complejas de ingeniería para su solución. *Suárez Díaz (2001).*

3.2.3.2 ROCA CRISTALINA

Este término es aplicado para diferenciar a las rocas ígneas y metamórficas (cristalinas) de las sedimentarias. Se trata de rocas fuertes masivas con una resistencia mayor a los procesos de deterioro. Estas se pueden encontrar en tamaños grandes que de acuerdo a su tipo y su grado de erosión pueden llegar a ser grandes peligros. De acuerdo con Hoek (2000), existen criterios fundamentales para poder realizar una evaluación práctica visual acerca del estado de las rocas cristalinas, las cuales son: tipo de

roca, grado de salientes, grado de erosión y discontinuidades. Por lo tanto, la evaluación de este factor se plantea siguiendo esos criterios.; las puntuaciones para estas características del factor se tendrán que dividir entre 3 para poder ser equivalentes con los demás factores (en el parámetro geología, todos los tipos de materiales tienen tres características excepto las rocas que contienen 9).

3.2.3.2.1 TIPO DE ROCA

Los caídos de roca en su mayoría, son controlados por la homogeneidad del macizo rocoso. El tipo de roca se ocupa de características específicas de las rocas ígneas-metamórficas. Anteriormente se vio que en los suelos sedimentarios la variación litológica es un gran problema que conduce a un derrumbe, en el caso de las rocas cristalinas se espera un comportamiento similar. La mejor forma de evaluar este factor es:

1. Riesgo bajo (3 pts.): Homogéneo/macizo. Implica pequeñas variaciones mineralógicas y litológicas dentro del macizo rocoso.
2. Riesgo medio (9 pts.): Pequeñas fallas/venas fuertes. Es válido el pensar que la presencia de venas en esta categoría insinúa poca pérdida de resistencia de la masa de la roca.
3. Riesgo alto (27 pts.): Esquistos/zonas de cizallamiento < 15 cm. Indica zonas de esquistosidad dentro del macizo rocoso que pueden contribuir a la inestabilidad. Estas zonas obviamente debilitarán el macizo rocoso y crearán avenidas para aumentar la erosión física y química.
4. Riesgo muy alto (81 pts.): Pegmatitas débiles/micas/zonas de cizallamiento > 15 cm. se trata de materiales pobres que debilitan la unión entre las rocas.

3.2.3.2.2 GRADO DE SALIENTES (BLOQUES EN CANTILIVER)

Generalmente cada que existen caídos de roca, la superficie se deforma dejando rocas salientes, que en cualquier momento pueden llegar a fallar y ocasionar daños a la vía, pero principalmente a los usuarios.

Las puntuaciones a este factor se otorgarán en base a las dimensiones de los salientes:

- Riesgo bajo (3 pts.): de 0 a 30 cm
- Riesgo medio (9 pts.): de 30 cm a 60 cm
- Riesgo alto (27 pts.): de 60 cm a 120 cm
- Riesgo muy alto (81 pts.): Mayores a 120 cm

3.2.3.2.3 GRADO DE EROSIÓN DE LA ROCA

El problema de la erosión no es un problema de corte profundo sino un problema de fuerzas en la superficie del suelo; la influencia de la geometría y la localización de las partículas tienen gran influencia.

La erosión reduce la resistencia al esfuerzo cortante debido a la fuerza disminuida de la roca intacta; la erosión de las rocas sanas generalmente se da por descomposición, lo cual se refiere a los cambios producidos por agentes químicos como la oxidación (por ejemplo, el descoloramiento amarillo en roca que contiene hierro), la humidificación y la carbonatación (por ejemplo, la solución de caliza).

Debe de quedar claro que este factor se refiere al grado de erosión a largo de las rocas intactas y no de las discontinuidades. Una vez más el ingeniero evaluador deberá de aplicar sus conocimientos para poder determinar el nivel de degradación que presentan los macizos rocosos, en base a características como el color, rugosidad, partículas desprendidas, etc. Los criterios de evaluación son los siguientes:

1. Riesgo bajo (3 pts.): Reciente. Ningún signo visible de la roca deteriorándose con el tiempo. Descoloramiento leve.
2. Riesgo medio (9 pts.): Superficie desgastada/decolorada. El descoloramiento indica el deterioro de la superficie de la roca. Todo el material de la roca puede estar descolorido por la erosión y está más débil externamente que una condición de erosión reciente.
3. Riesgo alto (27 pts.): Ligeramente alterado/atenuado. Un poco menos de la mitad de la roca esta desintegrada como un suelo.
4. Riesgo muy alto (81 pts.): Alterada. La mitad o más de la mitad de la roca esta desintegrada, la roca que permanece intacta presentan características de descoloramiento y pequeños desprendimientos.

3.2.3.2.4 DISCONTINUIDADES

Las investigaciones geológicas usualmente categorizan las discontinuidades de acuerdo a la manera en la cual fueron formadas. Las discontinuidades están presentes en la roca y afectan la resistencia, permeabilidad y durabilidad de la masa. Es importante evaluar la geometría, naturaleza, estado y condición de las discontinuidades, porque ellas definen la fábrica estructural del macizo rocoso. Además de su génesis, la influencia en el comportamiento del macizo, exige evaluar la génesis de los rellenos, la cantidad de agua, las cicatrices y revestimientos en las paredes por materiales solubles, la abertura, rugosidad y persistencia de las discontinuidades, y el número de familias. Ver Figura 7.

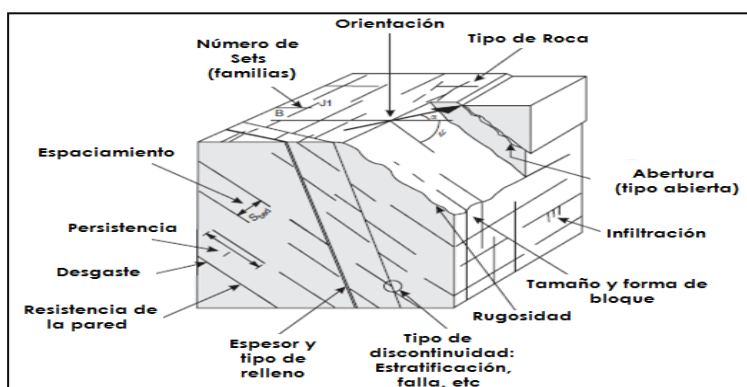


Figura 7.- Características geológicas de un macizo rocoso. Presentación de discontinuidades. *Wyllie Duncan C. & Mah Cristopher W. (2005)*

3.2.3.2.4.1 TAMAÑO DE BLOQUES/VOLUMEN

El tamaño de los bloques nos otorga información del espaciamiento de las discontinuidades. Los acontecimientos de falla pueden darse por la caída de un solo bloque o por un volumen de material de varios tamaños, incluso suelo. Deben de identificarse los puntos críticos que presentan mayor probabilidad de derrumbarse; los mayores bloques también causaran más daño durante una colisión con

un vehículo. Además, entre mayor sea el volumen de material que se ha desprendido existe mayor probabilidad de desalojar otros bloques y resulte en un evento más grande.

3.2.3.2.4.2 NÚMERO DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

Es indicativo del grado de fracturamiento y depende de la dirección y tipo de esfuerzos. Las familias presentan características distintivas, no solamente en dirección y espaciamiento, sino también en condiciones de relleno, caudal e incluso edad y tipo de esfuerzos que la origina. El número de familias que se intersecan una con otra influenciará la extensión para la cual la masa de roca puede deformarse sin el fracaso de la roca intacta. Conforme el número de familias de discontinuidades aumente y el tamaño de los bloques disminuye, existe la probabilidad de que los bloques se aplasten bajo cargas aplicadas.

3.2.3.2.4.3 LONGITUD DE LAS DISCONTINUIDADES (PERSISTENCIA) Y ORIENTACIÓN

La persistencia de discontinuidades es uno de los parámetros más importantes porque define, conjuntamente con el espaciamiento, el tamaño de bloques que podrían deslizarse de la cara. Además, un área chica de roca intacta entre las persistencias bajas puede tener una influencia positiva sobre la estabilidad, porque la fuerza de la roca a menudo será muy superior al esfuerzo cortante actuante en el talud. En la orientación, más allá de calcular la posición espacial de la superficie de discontinuidad, se trata de evaluar mediante la observación, la actitud de los bloques y fracturas para efectos de estabilidad. Nos enfocaremos en el sentido de la inclinación de los estratos (buzamiento).

Se establece como adverso cuando se vislumbra fuera de la cara del talud y como favorable cuando buza hacia adentro de la cara del talud. En la evaluación del corte se podrá tener discontinuidades con persistencia pequeña y en primera instancia el factor tomará una puntuación baja, pero si esas discontinuidades vislumbran en orientación desfavorable para la carretera, tendrán una puntuación más alta; o viceversa pudieran tener alta persistencia, pero orientación favorable, lo que marcaría una puntuación más baja.

3.2.3.2.4.4 ABERTURA

Es la distancia perpendicular entre las paredes de las discontinuidades cuando estas no tienen relleno (sólo agua o aire). Hay diaclasas cerradas. Para los rangos de puntuación se toman las propuestas por el ISRM, que se extienden de 0.1 mm hasta mayores de 5 mm. La abertura debe distinguirse de la "anchura" de una discontinuidad llena. Es importante predecir el comportamiento probable de la masa de la roca, como la deformación y conductividad hidráulica bajo los cambios de tensión, así como entender la razón por la que esas discontinuidades se desarrollan. Entre mayor sea la abertura, mayor peligro existe. Para la puntuación de este factor, se tomarán las aberturas de condiciones más adversas.

3.2.3.2.4.5 CONDICIONES DE EROSIÓN

La erosión en las discontinuidades es una condición sobre la cual varios autores coinciden, donde la describen como un factor primario físico y químico causante de peligro. La energía de las superficies de discontinuidades tiene una mayor influencia sobre el potencial de falla de las masas de roca, y el desgaste químico reduce las propiedades mecánicas a lo largo de las superficies de discontinuidad, reduciendo la cohesión y la fricción. La descomposición química y alteración hidrotermal degradan la fuerza de la masa entera de la roca. En base a lo anterior, las puntuaciones otorgadas a este factor son:

1. Riesgo bajo (3 pts.): Reciente. Ningún signo visible de deterioro. Descoloramiento leve.
2. Riesgo medio (9 pts.): Superficie desgastada/decolorada. El descoloramiento indica el deterioro de la superficie de la roca.
3. Riesgo alto (27 pts.): Aberturas llenas de material granular. Cuando las aberturas están llenas de un material es más propensa a la inestabilidad. El material granular podría ir desapareciendo poco a poco, ocasionando asentamientos y falla de las rocas.
4. Riesgo muy alto (81 pts.): Aberturas llenas de material arcilloso. La presencia de arcilla indica una superficie con alto potencial de deslizamiento.

3.2.3.2.4.6 FRICCIÓN (RUGOSIDAD ENTRE DISCONTINUIDADES)

Rangos del parámetro basado en estudios de Barton (Wyllie Duncan C. & Mah Christopher W., 2005). La aspereza de una superficie de discontinuidad es a menudo, un componente importante de la resistencia al corte, especialmente donde la discontinuidad no es degradada e interestratificada. La aspereza se pone menos importante donde la discontinuidad está rellena de algún material. La aspereza debe ser observada principalmente en superficies que anticipan un deslizamiento debido a su dirección. Si existe una superficie rugosa, la puntuación será baja, en caso contrario será tan alta como tan plana sea.

3.2.3.3 BLOQUES EN UNA MATRIZ/ROCAS ENVUELTAS EN SUELO

Son masas incoherentes de materiales sueltos y heterogéneos de suelo y fragmentos de roca depositados por lavado de la lluvia, reptación o deslizamiento. Son llamados matriz-soportados, ya que existen desde rocas pequeñas, rocas de varios tamaños hasta rocas grandes que permanecen unidos mediante una masa de suelo. Es común que se encuentren en un estado de equilibrio límite, es decir que si te tocan se mueven. Pueden ser: coluviones, suelos residuales cubiertos por coluviones, suelos volcánicos (aglomerados volcánicos, cenizas volcánicas), flujos de escombros, eólicos, glaciales, etc.

3.2.3.3.1 TAMAÑO DEL BLOQUE

El tamaño del bloque será evaluado basado en que los mayores bloques poseen más energía cinética para bajar rodando por el talud, y por consiguiente tienen mayor una oportunidad de alcanzar la carretera. Aunque los mayores bloques presentan más de un peligro, es probable que los bloques más pequeños pueden caer más frecuentemente de estos taludes. Se requeriría mucha más erosión de material matricial para desalojar una roca de diámetro 1.5 m que una roca de diámetro de 0.30 m. Los

rangos para el tamaño del bloque fueron realizados recordando esto. Las puntuaciones no fueron asignadas simplemente basándose en el aumento de tamaños de los bloques en el talud, más bien las puntuaciones fueron asignadas a los bloques más grandes que tienen la mayor probabilidad de ser inestables.

3.2.3.3.2 FORMA DEL BLOQUE

De acuerdo a la forma del bloque, será la forma en que este se desprenda de la matriz de suelo, así como la forma de llegar a la carretera, velocidad y arrastre de materiales más pequeños durante su desplazamiento, por ejemplo, un coluvión o bloques tabulares no representarían un riesgo tan grande como un depósito glacial con rocas grandes redondeadas, cuya forma se desarrolló dentro de la matriz. Los criterios de evaluación son los siguientes:

- Riesgo bajo (3 pts.): bloques tabulares.
- Riesgo medio (9 pts.): bloques cúbicos, seis caras relativamente planas.
- Riesgo alto (27 pts.): cúbicos a angulares.
- Riesgo muy alto (81 pts.): redondas/lisas y rocas planas con inclinación hacia la vía.

3.2.3.3.3 DESLIZAMIENTOS/DESPLAZAMIENTOS

Este factor trata de advertir sobre los movimientos lentos del terreno. Para su evaluación se requiere un amplio recorrido del talud de corte, se deben de visualizar aumento de presiones en el pie del talud, inclinación de la vegetación y de los señalamientos. Fracturas en el pavimento, son indicadores de que se está ejerciendo presiones horizontales sobre el terraplén a causa del desplazamiento lento del corte de talud. Lo más importante es notar la presencia de escalonamientos en el cuerpo del corte, pues esto indicaría la presencia de deslizamientos superficiales (creep), movimientos del cuerpo del talud y flujos. Por tal motivo los rangos para las puntuaciones son los siguientes:

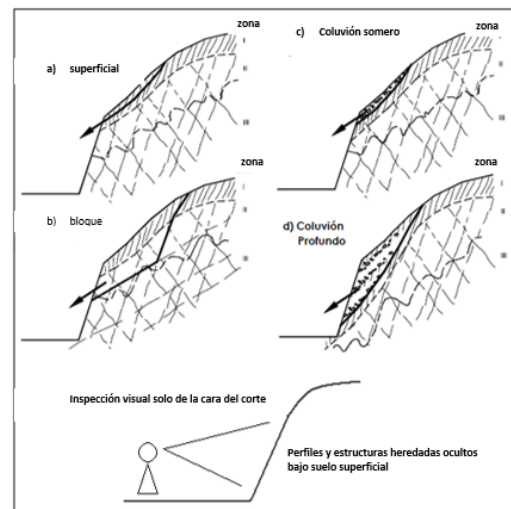
- Riesgo bajo (3 pts.): Agrietamientos en la corona del talud.
- Riesgo medio (9 pts.): Agrietamientos y hundimientos notables en el cuerpo del talud.
- Riesgo alto (27 pts.): Material suelto, vegetación notablemente inclinada, acumulación de material en el pie del corte.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Presencia de gradas.

3.2.3.3.4 SUELOS RESIDUALES

Los suelos residuales son los que resultan de la meteorización y descomposición de la roca in situ, sin sufrir ningún transporte. A los suelos residuales se les encuentra principalmente en zonas tropicales, donde aparecen en grandes espesores debido al proceso de meteorización intenso, heterogéneo y desigual.

Para la evaluación de la estabilidad de taludes en suelos residuales, existen tres conceptos que desempeñan un papel muy importante: el perfil de meteorización, las estructuras heredadas y el efecto del agua subterránea. Aunque es de importancia mencionar que, para la metodología presentada, estas características resultan ser parámetros difíciles de evaluar, debido a que el análisis solamente visual es solo de la cara del talud de corte lo que limita a poder analizar las características de riesgo debajo del suelo residual (Figura 8). Por lo tanto, para poder evaluar de una forma práctica y sin ninguna necesidad de adentrarnos a más detalles complicados la evaluación dependerá del análisis cualitativo del suelo, el escurrimiento superficial y el contacto de suelo con roca.

Figura 8.- Perfiles de meteorización y tipos de deslizamientos en suelos residuales. *Suárez Díaz (2001)*



3.2.3.4.1 CONCEPTOS DE HORIZONTE Y CAPA

La anisotropía vertical del perfil de un suelo está determinada por los horizontes y/o capas que lo constituyen, los cuales son aproximadamente paralelos a la superficie (Figura 26). Se entiende como perfil de suelo a la sección vertical de éste, y como horizonte a un estrato originado por el intemperismo. El concepto capa de suelo debe ser entendido como un estrato en el cual el grado de alteración del material es débil, por lo que se consideran varias de las propiedades inherentes al material parental.

3.2.3.4.2 ANÁLISIS CUALITATIVO DEL SUELO

Este tipo de análisis, denominado ABC, se aplica para definir y establecer la nomenclatura correspondiente a cada horizonte y/o capa, en términos cualitativos. Los sistemas para la nomenclatura de los horizontes, a través de las observaciones de campo, permiten hacer notar tanto su morfología como el grado evolutivo de los horizontes y del perfil en su conjunto. *Gama Castro J.E., et.al. (1998)*.

Un suelo puede clasificarse según el tipo y número de horizontes presentes en su perfil. Sin embargo, para ello se presentan innumerables dificultades, por lo que es necesario señalar que, hasta el presente, la identificación de los horizontes ha sido más un arte basado en la experiencia de campo, que una técnica fundada en algún grupo de principios definidos.

Para poder contribuir a la evaluación del riesgo, se otorgan calificaciones al talud de corte en base al horizonte que visualmente presente el tipo de material del cual está constituido. Dejando en claro que el horizonte A es el más débil debido a que es producto de una intemperización mayor. De acuerdo con esto, las puntuaciones son las siguientes:

- Riesgo bajo (3 pts.): Horizonte B-C
- Riesgo medio (9 pts.): Horizonte B
- Riesgo alto (27 pts.): Horizonte A-B
- Riesgo muy alto (81 pts.): Horizonte A

3.2.3.4.3 ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

Los suelos más susceptibles a la erosión son los residuales y el mecanismo principal causante de ello es el agua. La susceptibilidad de un perfil de suelo residual a ser erosionado varía de un material a otro. Una buena forma de evaluar el riesgo que presenta un talud al deslizamiento, dependerá de las marcas de agua que presente en su superficie.

La acción de golpeo de la lluvia y el flujo de agua generado en la dirección principal de la pendiente sobre la cara del talud, forma inicialmente torrentes pequeños de agua y a medida que la cantidad de flujo es mayor, esos torrentes se forman en surcos, los cuales se hacen más profundos y de menor densidad por una unidad de área. Los surcos paralelos forman una red de drenaje en la cual los surcos más profundos rompen la divisoria de los surcos más pequeños, formando cárcavas en la corona del talud, lo que provoca deslizamientos considerables de material.

De acuerdo al grado de erosión provocada por los escurrimientos superficiales que presente la pared del talud, será la puntuación que se le otorgue:

- Riesgo bajo (3 pts.): El cuerpo del talud solo presenta pequeñas venas y pequeños torrentes.
- Riesgo medio (9 pts.): Se pueden observar inicios de formaciones de surcos.
- Riesgo alto (27 pts.): Mas de la mitad del cuerpo del talud presenta torrentes y surcos.
- Riesgo muy alto (81 pts.): Ya existen formaciones de cárcavas

3.2.3.4.4 CONTACTO SUELO SOBRE ROCA

De acuerdo a los diferentes estudios de campo que se han realizado alrededor del mundo, se ha observado que los suelos tienden a fallar cuando existe cercanía con una roca y cuando hay presencia de agua. El suelo puede llegar a saturarse y deslizarse por medio de la roca. Por lo tanto, al detectar, rocas incrustadas en el suelo, rocas sosteniendo al suelo, entre otras, se deberá evaluar el riesgo de acuerdo a rugosidad de la superficie de las rocas.

CAPITULO IV. CLASIFICACIÓN DE DATOS MEDIANTE LA EVALUACIÓN CON ESTADÍSTICA MULTIVARIANTE.

El análisis clúster es un método estadístico multivariante de clasificación automática de datos. A partir de una tabla de casos-variables, trata de situar los casos (cortes o terraplenes, según sea el caso) en grupos homogéneos, conglomerados o clusters, no conocidos de antemano, pero sugeridos por la propia esencia de los datos, de manera que puedan ser considerados similares sean asignados a un mismo clúster, mientras que cortes y/o terraplenes diferentes (disimilares) se localicen en clusters distintos. El análisis clúster define grupos distintos como sea posible en función de los propios datos.

Divide las observaciones en grupos basándose en la proximidad o lejanía de unas cosas con otras, por lo tanto, es esencial el uso adecuado del concepto de distancia. De las dos grandes categorías en las que se suelen estructurar estos métodos (jerárquicos y no jerárquicos), el procedimiento que se va a seguir en esta evaluación es el aglomerativo jerárquico; es aglomerativo porque a partir de las observaciones éstas se van agrupando de forma progresiva en grupos o clusters cada vez mayores y son jerárquicos porque cada nueva fusión se va ampliando conforme decrece la similitud entre los mismos (Pérez, 2004).

Debemos tener en cuenta las siguientes consideraciones relativas a la selección de las variables:

- Esta técnica de análisis se puede aplicar sobre variables con cualquier nivel de medida, aunque, es conveniente, que éste sea el mismo para todas ellas.
- Del mismo modo, las variables seleccionadas deben tener la misma escala pues, de lo contrario, los resultados pueden verse afectados. Si las variables no tienen la misma escala aquella que tenga mayor rango tendrá mayor peso en la medida de semejanza y/o distancia que seleccionemos para establecer los grupos.

Para nuestro caso, por ser variables cualitativas, y en general para datos binarios (o dicotómicos) procedemos a la estandarización previa de las variables cuyos valores reflejen la presencia o ausencia de la característica medida. Generalmente, la presencia de la característica (puntuaciones de 3, 9, 27 o 81) se codifica con el valor 1 y la ausencia con el valor 0. Partiendo de una tabla de frecuencias de 2x2 (Tabla 4) obtenemos la medida de proximidad o similitud en la que representa el número de elementos de la población en los que se constata la presencia o ausencia del factor en estudio.

Tabla 5.- Tabla de frecuencias, (Pérez, 2004).

Variable 1 Variable 2 ↓	Presencia	Ausencia
Presencia	a	b
Ausencia	c	d

Las principales medidas son las siguientes:

$$\text{Russel y Rao } RR_{xy} = \frac{a}{a+b+c}$$

$$\text{Parejas Simples } PS_{xy} = \frac{a+d}{a+b+c+d}$$

$$\text{Jaccard } J_{xy} = \frac{a}{a+b+c}$$

$$\text{Dice y Sorensen } D_{xy} = \frac{2a}{2a+b+c}$$

$$\text{Sokal y Sneath } SS_{xy} = \frac{2(a+d)}{2(a+d)+b+c}$$

$$\text{Rogers y Tanimoto } RT_{xy} = \frac{a+d}{a+d+2(b+c)}$$

$$\text{Sokal y Sneath (2) } = SS2_{xy} = \frac{a}{a+2(b+c)}$$

$$\text{Kulczyński } = K_{xy} = \frac{a}{b+c}$$

La Tabla 5, a se refiere al número de casos que comparten la presencia de ambas características, d se refiere al número de casos que comparten la ausencia de ambas características (a y d son las concordancias), b y c se refieren el número de casos que presentan una característica y no la otra (las discordancias). Obtenemos así, la matriz inicial de datos o también llamada matriz de similitud o distancia.

Una vez determinada la matriz inicial de datos (constituida por un conjunto mínimo de variables significativas, no correlacionadas y medidas en la misma unidad y escala), cuantificamos la proximidad o similitud que presentan las unidades de análisis respecto a los valores que en cada una de ellas toman dichas variables (o factores).

La proximidad puede medir la distancia o la similitud entre los factores presentes en cada corte y/o terraplén. El valor que se obtiene en una medida de distancia es tanto mayor cuanto más próximos están los elementos considerados, por ende, se aplica la distancia euclídea.

A partir de la matriz de similitud o distancias que se genera, elegimos un algoritmo con el cual poder formar los grupos entre los cortes y/o terraplenes evaluados, en base a la relevancia o interpretación de los grupos obtenidos. Una vez concluido el proceso de formación de conglomerados, a partir de la solución obtenida en cada una de las etapas se decidirá el número de conglomerados que se forman.

No obstante, para facilitar esta decisión se plasma de forma gráfica la información contenida en el historial de conglomeración. Uno de los gráficos que se identifican y servirá para identificar los tres grupos es el dendograma (Figura 9). El cual, es el gráfico más representativo de este tipo de análisis, la cual asume la forma de un árbol de clasificación en el que es posible observar con toda claridad la forma y el número de los grupos que se van formando. En este gráfico es el eje de ordenadas el que adquiere verdadero protagonismo pues representa los distintos niveles de similitud en torno al cual se han ido agrupando las unidades de análisis en función de la medida elegida. En el eje de abscisas únicamente se identifican los casos u observaciones.

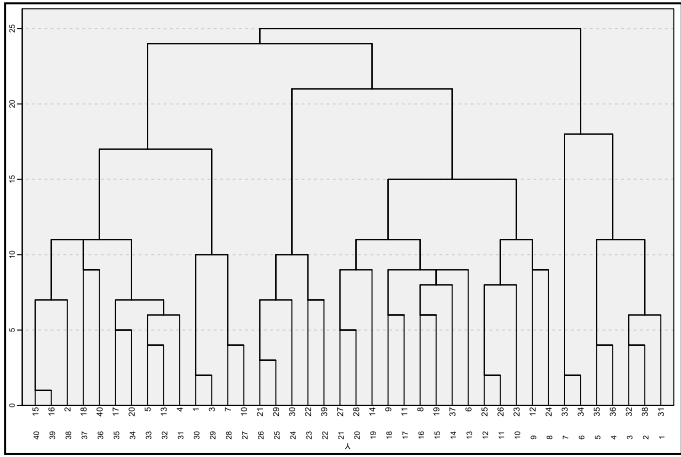


Figura 9.- Representación gráfica de un dendograma (Pérez,2004).

Los grupos resultantes son denominados con un nivel de inestabilidad: Bajo (grupo 1), Medio (grupo 2) y Alto (grupo 3). Los rangos que delimitan a estos grupos se proponen en primera instancia en base a la obtención de la media estadística de los valores del IGE (IGE_{CC} o IGE_{TC} , según el caso) localizados en cada grupo. De los valores de las medias, se selecciona los que marcan un límite apropiado entre cada grupo.

Obteniendo así los rangos de puntuación IGE para cada nivel de inestabilidad que presenten los cortes (IGE_{CC}) y terraplenes (IGE_{TC}) carreteros a evaluar (Tablas 6).

Tabla 6. Rangos IGE_{CC} y IGE_{TC}

NIVEL DE INESTABILIDAD	PUNTUACIÓN IGE_{CC}	PUNTUACIÓN IGE_{TC}
BAJO	< 150	<200
MEDIO	150 – 300	200 – 400
ALTO	> 300	> 400

4.1 VALIDACIÓN ESTADÍSTICA

Para que el análisis de conglomerados y la evaluación de los cortes y terraplenes carreteros tengan una validez, es necesario que los puntajes IGE de cada grupo obtenido, así como el puntaje total de la unión de los grupos presenten una distribución normal.

Las técnicas de estadística se utilizan para evaluar la razonabilidad de la clasificación de los rangos de peligro. Las distribuciones de las calificaciones o histogramas de los tres grupos de riesgo obtenidos, así como el grupo combinado de los tres; se comparan con la distribución normal de curvas.

4.1.1 PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

Procedimiento de bondad de ajuste, es decir, permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica. El objetivo es señalar si los datos de cada grupo provienen de una población que tiene la distribución teórica especificada.

Esta prueba se realiza para comprobar que la distribución normal de las calificaciones IGE de los cortes y terraplenes carreteros en cada grupo, así como el de la unión de los tres sea verdadera. Se plantea la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_a):

- La hipótesis nula (H_0) se rechaza cuando los datos muestrales proporcionen evidencia convincente de que es falsa, o sea, que las puntuaciones IGE siguen una distribución normal (p -valor > 0.05); donde 0.05 corresponde al nivel de significación con el que uno quiere rechazar la hipótesis nula.
- La hipótesis alternativa (H_a) es una afirmación que se acepta si los datos muestrales proporcionan evidencia suficiente de que la hipótesis nula es falsa, o sea, que las puntuaciones IGE no siguen una distribución normal (p -valor < 0.05).

4.1.2 ANALISIS DE VARIANZA (PRUEBA ANOVA)

La prueba de varianza (ANOVA) nos permite comparar si existe diferencia entre las medias de los tres grupos obtenidos (Alto, Medio y Bajo). Se basa en la comparación de las sumas de cuadrados medias debidas a la variabilidad entre-grupos y la debida a la variabilidad intra-grupos (dentro de los grupos). Ambas sumas son estimaciones independientes de la variabilidad global, de manera que, si el cociente entre la primera y la segunda es grande, se tendrá mayor probabilidad de rechazar la hipótesis nula. Se plantea la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_a):

- $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$
- $H_a = \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

Por ello, un p -valor < 0.05 indicara que las medias son estadísticamente distintas y la hipótesis nula se rechaza. En caso contrario (p -valor > 0.05), la hipótesis nula es aceptada.

4.1.3 PRUEBA T-TEST

Para verificar la validez del criterio de los rangos de puntuación establecidos por el análisis de conglomerados, se utiliza una prueba t-test con la cual se compara con los límites superiores e inferiores de cada grupo de acuerdo a su nivel de inestabilidad. Los criterios de rechazo de la hipótesis nula se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7.- Criterios de rechazo de hipótesis nula.

	GRUPO 1	GRUPO 2		GRUPO 3
HIPÓTESIS	$H_0 = \mu \leq \mu_0$	$H_0 = \mu \geq \mu_0$	$H_0 = \mu \leq \mu_0$	$H_0 = \mu \geq \mu_0$
	$H_a = \mu > \mu_0$	$H_a = \mu < \mu_0$	$H_a = \mu > \mu_0$	$H_a = \mu < \mu_0$
	$\mu_0 = 130$	$\mu_0 = 130$	$\mu_0 = 300$	$\mu_0 = 300$
REGIÓN DE RECHAZO PARA EL NIVEL DE PRUEBA $\alpha=0.05$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$
	y	y	y	y
	$t > 0$	$t > 0$	$t > 0$	$t > 0$

Al concluir con estas pruebas de validez estadística sabemos que los rangos de puntuación son adecuados.

CAPITULO V. EVALUACIÓN DEL TRAMO PILOTO

El tramo piloto fue determinado considerando principalmente el clima tropical que presenta la región. Se sabe que las regiones tropicales son más susceptibles a fallar debido a las grandes cantidades de lluvia. La autopista Maravatío-Zapotlanejo cuenta principalmente con perfiles geológicos de suelos residuales y rocas envueltas en matrices de suelo arcilloso, que son indicadores de grandes problemas.

5.1 ASPECTOS GENERALES DEL TRAMO PILOTO.

5.1.1 UBICACIÓN

La autopista Maravatío-Zapotlanejo es parte de la vía que comunica a la ciudad de México con la ciudad de Guadalajara. Tiene una longitud de 309.700 km. Inicia en el municipio de Maravatío (km 167 + 000) que colinda al norte con el estado de Guanajuato, y pasa por 6 puntos importantes: Maravatío, Zinapécuaro, Panindícuaro, Ecuandureo, pertenecientes al estado de Michoacán así como Ocotlán, Zapotlanejo pertenecientes al estado de Jalisco (Figura 10).



Figura 10.- Autopista Maravatio – Zapotlanejo. SCT (2010)

5.1.2 HIDROLOGÍA

La superficie de aguas superficiales que encierra a la Autopista Maravatio-Zapotlanejo está conformada por el sistema: Lerma (cuenca 47,116 km²) – Santiago (cuenca 76,400 km²) – Cuitzeo (3,977 km²)- Chápala (cuenca 1,202 km²). La cuenca del lago Cuitzeo, junto con la depresión de Chápala conforman la depresión lacustre Cuitzeo - Chápala.

5.1.3 CLIMA

Los estados por donde atraviesa la autopista presentan diferentes climas a lo largo de su territorio, debido a que están determinados por varios factores como las diversas condiciones atmosféricas, la altitud sobre el nivel del mar, la latitud geográfica y la distribución existente de tierra y agua. Por lo anterior clasificaremos el clima de una forma generalizada de acuerdo al Comisión Nacional del Agua de México (Figura 11).

La clasificación nacional está dada por:

Cálidos:

- 1. Cálido húmedo
- 2. Cálido Sub-húmedo

Secos:

- 3. Seco
- 4. Muy seco

Templados:

- 5. Templado sub-húmedo
- 6. Templado húmedo

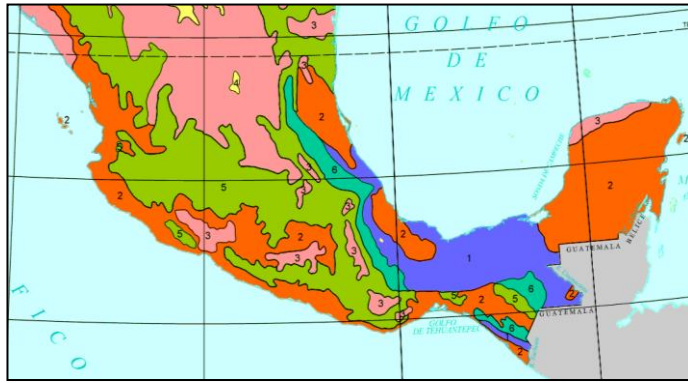


Figura 11.- Grupos y subgrupos de climas de México.
INEGI (2010)

Por lo tanto, el clima del territorio por el cual pasa la autopista Maravatío-Zapotlanejo es de régimen (5) “templado sub-húmedo” perteneciente a la categoría de climas templados. La clasificación templada sub-húmedo, se encuentra en el 20.5% del país, observa en su mayoría temperaturas entre 10° y 18° C y de 18° a 22°C; algunas regiones pueden disminuir a menos de 10°C; registra precipitaciones de 600 a 1,000 mm en promedio durante el año.

5.1.4 TIPO DE RELIEVE

El tipo de relieve existente de acuerdo a los datos que se tienen por parte del Instituto Nacional de Ecología (INE) e INEGI, es un régimen predominante de cerros (lomeríos) del lado del estado de Michoacán, con una disección vertical ligera de 40 a 60 (m/km²) y colinas con una disección vertical fuerte de 30 a 40 (m/km²). Sobre el estado de Jalisco en la parte de Ocotlán- Zapotlanejo, se presenta un relieve montañoso con disección ligera de 100 a 250 (m/km²) así como llanuras onduladas con disección de 10 a 15 (m/km²).

De acuerdo a su grupo morfológico, la mayor parte del territorio sobre el cual atraviesa la autopista se presenta una clasificación de relieve tipo volcánico. Los relieves cercanos a los lagos Cuitzeo y Chápala son de tipo fluvial. Todo lo anterior, es una noción general sobre las condiciones de relieve que presenta el tramo piloto (Figura 12).

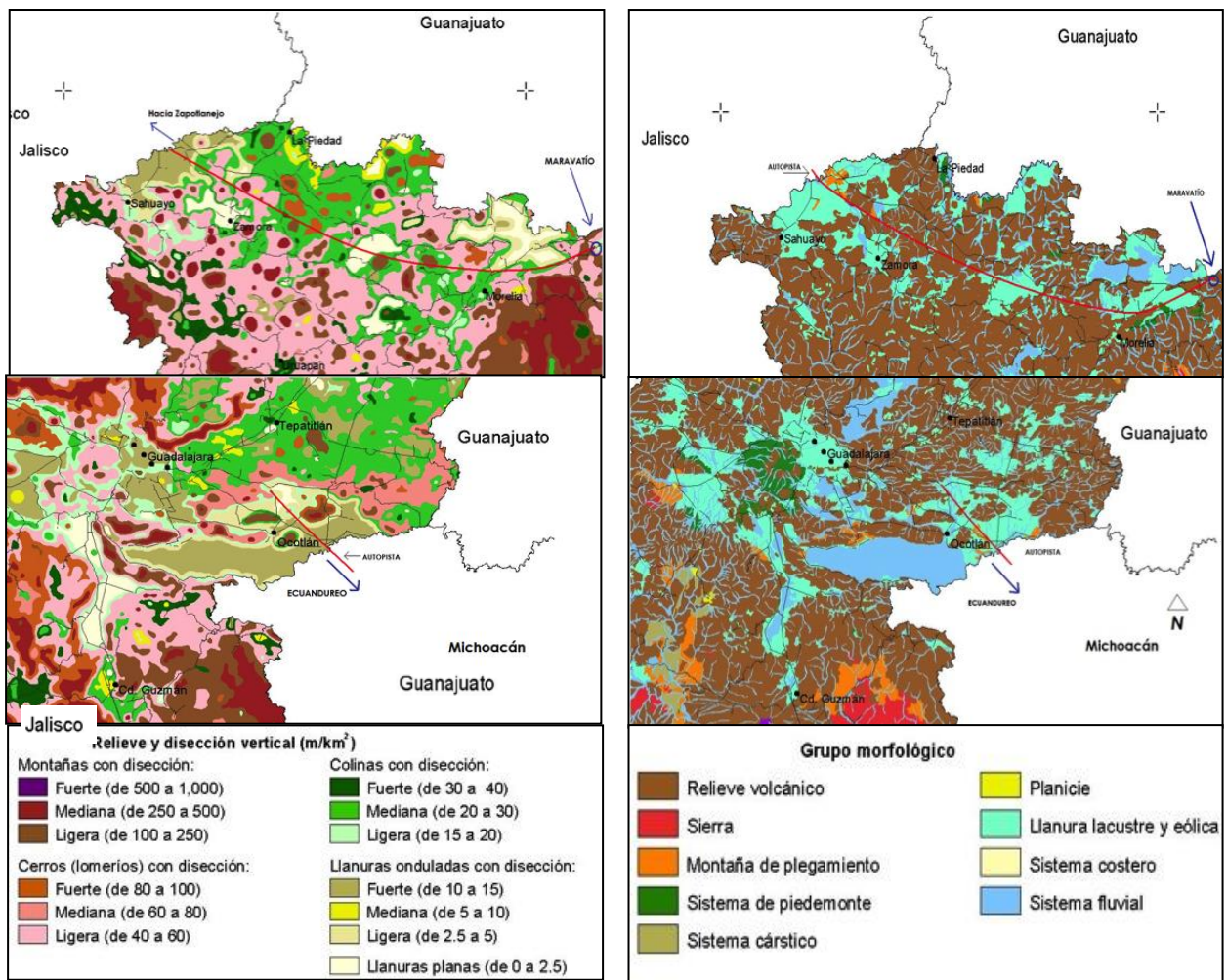


Figura 12.- Tipos de relieve, INE (2010)

5.1.5 VEGETACIÓN Y USO DEL SUELO

De acuerdo al Instituto Nacional de Ecología (INE, 2010), las regiones aledañas a la vía presentan una vegetación y uso de suelo de tipo (Figura 31):

- Bosque de coníferas (pinos)-Latifoliadas (encinos)
- Agricultura de riego y humedad
- Selva caducifolia – subcaducifolia
- Pastizales con agricultura de temporal

5.1.6 GEOLOGÍA

La investigación que se pretende implementar para la gestión de cortes y terraplenes carreteros no incluye una evaluación del tipo y forma del suelo más allá de la simple observación. Esto marca un reto muy importante para el ingeniero evaluador pues resulta muy difícil determinar la geología de un sitio sin hacer las debidas pruebas de clasificación.

Como ya se había mencionado, la autopista Maravatío-Zapotlanejo pasa por los territorios de Michoacán y Jalisco, por lo que se analizará la geología general de estos lugares mediante los mapas proporcionados por el INEGI en su red virtual de servicios (Figura 12).

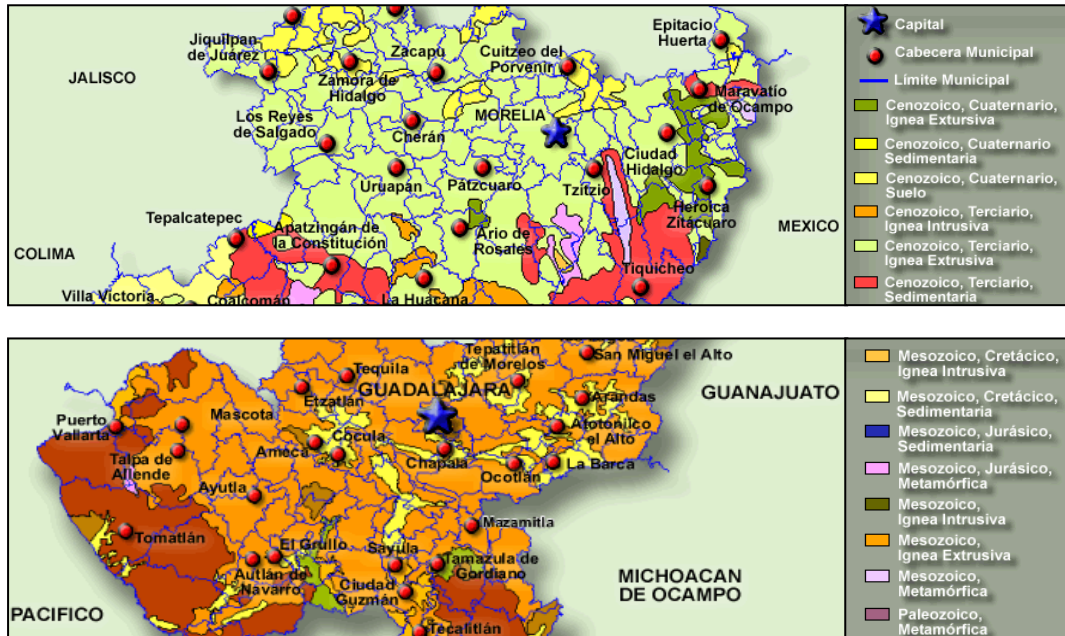


Figura 12. Geología general, INEGI (2010)

5.1.7 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA VÍA

La autopista está constituida por dos cuerpos (A y B), ambos con 2 carriles de 3.50 m (7.00 m de calzada), 1.5 m de acotamiento lado externo, 0.50 lado interno, con una faja separadora central (cuneta central) de 5 m. Su Tráfico Diario Promedio Anual (TDPA) oscila entre los 5000 a 6000 vehículos según datos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Los meses de más presencia de lluvias es de mayo a septiembre, debido a las características climáticas de los estados vinculados en su trayecto (límites de Guanajuato, Michoacán, Jalisco), la apariencia puede ser desde relativamente seca hasta húmeda. El estado de la carpeta asfáltica presenta fisuras y desprendimientos superficiales durante la mayoría de la longitud de la vía.

5.2 CÁLCULO DEL IGE_{TC} EN TRAMO PILOTO

Se presentan tres ejemplos de terraplenes evaluados en el tramo piloto para mostrar la metodología y ver la clasificación otorgada a un terraplén por medio de puntuaciones a factores de riesgo (nivel de estabilidad alto, medio y bajo). En el tramo piloto no se presentó ningún terraplén con un IGE_{TC} > 300 pts. por lo que, para ejemplo se considera, uno de estabilidad baja (IGE_{TC} < 150 pts.) y dos de estabilidad media (150 ≤ IGE_{TC} ≤ 300).

✚ Ejemplo 1. Terraplén en el Km. 430+650, cuerpo A.

1.- Presenta un ángulo de 48° con una altura de 20 m. Con una vegetación densa (90%) con altura promedio de 25 cm. Cerca de la vía se aprecia agrietamiento en talud de 2.5 cm. de ancho, riesgo de infiltración y deslizamiento (imagen 5.1).



Imagen 5.1. Talud del terraplén Km. 430+650.

1. En lavaderos se observa pequeño escalonamiento de 3 mm. y desgaste de la superficie no significativo. En la cuneta central existen grietas con ancho de 5 mm. y vegetación en ellas. En los tableros se observa grietas en bloque con separación de 3 mm. (imagen 5.2).
2. Se observó inicio de grietas por fatiga y ahuellamiento (profundidad de 4 mm.) en carril de baja. Grietas de borde con de 6 mm. de ancho en un 10% de la longitud total del terraplén, así como también grietas longitudinales con severidad alta (abertura 11 mm.). Las grietas transversales que estaban selladas insatisfactoriamente, con 3mm. de ancho aprox. (imagen 5.3).

RESUMEN DE EVALUACIÓN

		FACTORES	PUNTAJACIÓN
GEOMETRIA		ANGULO	9
		ALTURA	27
VEGETACIÓN		ALTURA	9
		% DE COBERTURA	3
OBRAS DE DRENAJE		ESCALONAMIENTO	9
		GRIETAS	27
		DESGASTE DE LA SUPERFICIE	9
		DESPOSTILLAMIENTO	3
		FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	27
		SEPARACION DE LA CUNETA ^c /LA VIA	-
		OBSTRUCCIONES	3
		EROSIÓN	3
		ASENTAMIENTO	27
	PAVIMENTO		FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO
		GRIETAS EN BLOQUE	-
		GRIETAS DE BORDE	27
		GRIETAS LONGITUDINALES	81
		GRIETAS TRANSVERSALES	9
		AHUELLAMIENTO(RODERAS)	3
	BACHES	-	
CALIFICACION IGE_{TC} :			279

Imagen 5.2. Cuneta central del terraplén.

Inestabilidad media. Se presenta con un rango de: $150 \leq IGE_{TC} < 300$ puntos

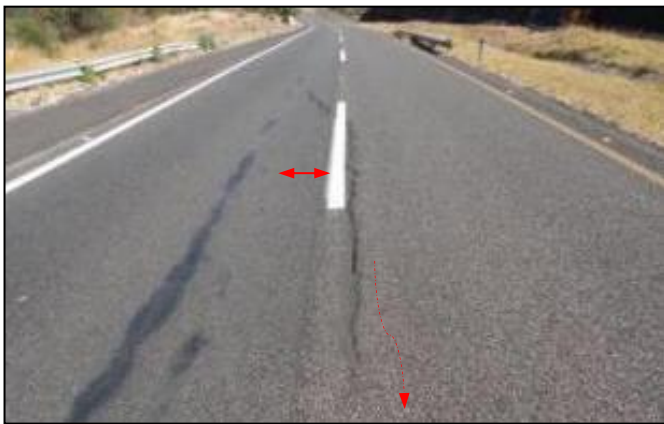


Imagen 5.3. Capa de rodamiento del terraplén km. 430+650

✚ Ejemplo 2: Terraplén en el km. 262+000, cuerpo A.

1. Ángulo de 30° y una altura de 18.50 m. Presenta una vegetación densa (100%) con una altura de 14 cm. Los arboles con altura mayor a 60 cm. se localizan en el pie del talud (imagen 5.4).
2. En la cuneta central existen grietas de 6 mm. de ancho y con presencia de vegetación en ellas. Con desgaste de los agregados y en cada tablero existen 2 bloques de fracturación (imagen 5.4).
3. Grietas longitudinales con severidad alta con abertura de 13 mm. Grietas de borde en un 30% de la longitud total del tramo con una abertura promedio de 7 mm. Roderas con una profundidad de 5 mm. en el carril de baja velocidad.
4. Se observa un asentamiento muy evidente en la calzada, comprendido en toda la longitud que abarca la grieta longitudinal.

Inestabilidad media. Se presenta con un rango de: $150 \leq IGE_{TC} < 300$ puntos



RESUMEN DE EVALUACIÓN

FACTORES		PUNTUACIÓN
GEOMETRIA	ANGULO	3
	ALTURA	27
VEGETACIÓN	ALTURA	3
	% DE COBERTURA	3
OBRAS DE DRENAJE	ESCALONAMIENTO	-
	GRIETAS	27
	DESGASTE DE LA SUPERFICIE	9
	DESPOSTILLAMIENTO	-
	FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	9
	SEPARACION DE LA CUNETA ^c /LA VIA	-
	OBSTRUCCIONES	-
EROSIÓN		3
ASENTAMIENTO		27
PAVIMENTO	FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO	3
	GRIETAS EN BLOQUE	-
	GRIETAS DE BORDE	81
	GRIETAS LONGITUDINALES	81
	GRIETAS TRANSVERSALES	9
	AHUELLAMIENTO (RODERAS)	9
BACHES		-
CALIFICACION IGE_{TC}:		294

Imagen 5.5. Capa de rodamiento del terraplén km 262+000

✚ Ejemplo 3: Terraplén en el km. 169+240, cuerpo A.

1. Tiene un ángulo de 35° y una altura de 8.50 metros. La vegetación localizada en el talud es densa con una altura promedio de 20 cm. (imagen 5.6).
2. No se presentaba evidencia de erosión en el talud ni asentamientos evidentes sobre la calzada.
3. En los lavaderos se identifico grietas selladas con un ancho < a 1mm. y una separación con la vía < a 1mm. En la cuneta central se observa un bloque de fracturamiento en cada tablero. Existen pequeñas piedras y material transportado por las lluvias, sin obstruir el flujo.
4. Existe inicio de grietas de borde, así como grietas longitudinales con una abertura de 2.5 mm. en carril de alta velocidad. y centro de línea (imagen 5.7).



Imagen 5.6. Terraplén Km. 169+240

Inestabilidad baja. Se presenta con un rango de: < 150 puntos

		FACTORES	PUNTUACIÓN
GEOMETRIA		ANGULO	3
		ALTURA	9
VEGETACIÓN		ALTURA	9
		% DE COBERTURA	3
OBRAS DE DRENAJE		ESCALONAMIENTO	3
		GRIETAS	3
		DESGASTE DE LA SUPERFICIE	3
		DESPOSTILLAMIENTO	-
		FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	3
		SEPARACION DE LA CUNETA ^c /LA VIA	3
		OBSTRUCCIONES	3
		EROSIÓN	3
		ASENTAMIENTO	3
		FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO	-
PAVIMENTO		GRIETAS EN BLOQUE	-
		GRIETAS DE BORDE	3
		GRIETAS LONGITUDINALES	9
		GRIETAS TRANSVERSALES	-
		AHUELLAMIENTO (RODERAS)	-
		BACHES	-
CALIFICACION IGE_{TC} :			60

Imagen 5.7. Capa de rodamiento del Terraplén km 169+240.

5.2 CÁLCULO DEL IGE_{CC} EN TRAMO PILOTO

Se presentan tres ejemplos (aleatoriamente) de cortes evaluados en el tramo piloto, con el fin de mostrar la metodología a seguir para poder clasificar a un talud de corte por medio de puntuaciones a factores de riesgo (nivel de estabilidad alto, medio y bajo).

✚ Ejemplo: Corte 262 + 000 cuerpo B (imagen 5.8).

1. Altura. 6.00 m, puntuación: 9 pts.
2. Mantenimiento / Limpieza. Según datos proporcionados el mantenimiento se realiza más de tres veces por año y en la limpieza se realizan tareas de barrido de acotamientos y limpieza de

cunetas con cargas y acarreos significantes. De acuerdo a la tabla 3.2, se tiene que la calificación para este factor es de 81 pts.



Imagen 5.8.- Corte 262 + 200 cuerpo B. Bloques en matriz de suelo: $IG_{ECC} = 615$

3. Ángulo. De acuerdo a la clasificación de suelo, presentando un ángulo de 60° , la puntuación para este factor es de 27 pts.
4. Irregularidades. Sumamente irregular. Calificación: 81 pts.
5. Tipo de sección transversal. Se otorga una calificación de 81 pts, pues es una sección tipo balcón con presencia de una grieta mayor a 5mm en la superficie de rodamiento del cuerpo A.
6. Área de captación de material desprendido. Se tiene que para una ángulo de 60° y una altura de 6.00m, las dimensiones aproximadas para un área de captación adecuada (cunetones) debería de ser de 1.00 m de profundidad (D_r) y 1.20 m de ancho (W_r). Las medidas reales resultan ser tan solo el ancho y profundidad de las cunetas: 1.00 m de ancho (W_a) X 0.40 m de profundidad (D_a). Por lo tanto, de acuerdo a la gráfica 4.1 del capítulo 4 se tiene que la calificación para el factor de captación es de 27 pts. Visto de otra forma:

$$Efectividad = \frac{D_a + W_a}{D_r + W_r} = \frac{0.40 + 1.00}{1.00 + 1.20} \times 100\% = 63\%$$

7. Vegetación. El cuerpo no presenta vegetación, por lo que la calificación para este factor es de 81 pts. La corona recibe una puntuación de 3 pts.
8. Clima:
 - Precipitación, la región pertenece a lluvias intensas, por lo que su puntuación se encuentra dentro del rango de 500 a 850 mm, recibiendo un puntaje de 27 pts.
 - Infiltración. El material se encuentra con apariencia de saturado, presenta agua escurriendo por las banquetas (en el mes de octubre, puesto que en enero presentaba desmoronamientos y signos leves de humedad). Calificación: 81 pts.
9. Geología-Rocas en una matriz de suelo:
 - Tamaño del bloque. Se observan rocas con tamaños entre 0.30 a 0.60 metros. Calificación: 9 pts.
 - Forma del bloque. Los granos tienen una forma cúbica-angular. Calificación: 27 pts.

- Deslizamientos desplazamientos. Existen hundimientos en la corona del talud así como claros desniveles (imagen 5.9). Calificación 81 pts.

Inestabilidad alta. Se presenta con un rango de: $IG_{Ecc} \geq 400$ puntos



RESUMEN DE EVALUACIÓN

FACTORES		PUNTUACIÓN
Características del talud	Altura	9
	Mantenimiento/limpieza	81
	Ángulo. Suelo	27
	Irregularidades	81
	Tipo de Sección	81
	Área de Captación	27
	Vegetación. Cuerpo	81
	Vegetación. Corona	3
Clima	Precipitación Media Anual	27
	Infiltración/agua presente	81
Geología	Tamaño del bloque	9
	Forma del bloque	27
	Deslizamientos/desplazamientos	81
IG_{Ecc}		615

Imagen 5.9 km 262 + 200 cuerpo B. Desplazamientos

✚ Ejemplo 1: Corte 295 + 600 cuerpo A (imagen 5.10).

1. Altura. 3.80 m, puntuación: 3 pts.
2. Mantenimiento / Limpieza. Según datos proporcionados el mantenimiento se realiza de forma estacional (1 vez por año) y en la limpieza se realizan algunas cargas y acarreos. De acuerdo a la tabla 3.2 se tiene que la calificación para este factor es de 9 pts.
3. Ángulo. De acuerdo a la clasificación de suelo, presentando un ángulo de 50° , la puntuación para este factor es de 27 pts.
4. Irregularidades. Presenta desprendimientos actuales sobre toda la superficie, empiezan a quedar rocas en cantiliver. Calificación: 81 pts.
5. Tipo de sección transversal. Tipo cajón sin fallas en el pavimento. Puntuación: 3 pts.
6. Área de captación de material desprendido. Como captación de material desprendido, el área del corte sólo presenta a la cuneta. De la misma forma que el corte anterior, la calificación es de 9 pts.
7. Vegetación. En el cuerpo se encuentra semidesnudo con pocas hierbas, por lo tanto su puntuación es de 27 pts. En la corona existe pocos arbustos por lo que su puntuación es de 27 pts.
8. Clima
 - La puntuación se encuentra dentro del rango de 500 a 850 mm: 27 pts.
 - Infiltración. Existen signos en las cunetas y en la cara del talud que indican la existencia de agua superficial. Calificación: 81 pts.
9. Geología-Rocas sedimentarias o suelos sedimentarios:
 - Descalce. Existe una leve erosión entre los pies de cada estrato: 9 pts.

- Interestratificación. Las interestratificaciones parecen resistentes a la erosión por escurrimiento interno de agua, pues no muestran indicios de desgaste. Calificación: 3 pts.
- Presencia de Surcos. A pesar de que existen pruebas de alta concentración de agua, el material parece un poco resistente a la erosión por escorrentía, pues no existe formación de surcos de importancia. Puntuación: 3 pts.

Inestabilidad media. Se presenta con un rango de: $250 \leq IGE_{cc} < 400$ puntos



RESUMEN DE EVALUACIÓN

FACTORES		PUNTUACIÓN
Características del talud	Altura	3
	Mantenimiento/limpieza	9
	Ángulo. Suelo	27
	Irregularidades	81
	Tipo de Sección	3
	Área de Captación	9
	Vegetación. Cuerpo	27
	Vegetación. Corona	27
Clima	Precipitación Media Anual (mm)	27
	Infiltración/agua presente	81
Geología	Descalce	9
	Grado de interestratificación	3
	Presencia de surcos	3
IGE_{cc}		309

Imagen 5.10 Corte 295 + 600 cuerpo A. Suelo Sedimentario.

✚ Ejemplo 3: Corte 295 + 600 cuerpo B (imagen 5.11).

1. Altura. 4.80 m, puntuación: 3 pts.
2. Mantenimiento / Limpieza. Según datos proporcionados el mantenimiento se realiza de forma estacional (1 vez por año) y en la limpieza se realizan algunas cargas y acarreos. De acuerdo a la tabla 3.2, se tiene que la calificación para este factor es de 9 pts.
3. Ángulo. De acuerdo a la clasificación de suelo, presentando un ángulo de 50° , la puntuación para este factor es de 27 pts.
4. Irregularidades. Presenta poca acumulación de material en el pie del talud, lo que ha generado que muchas rocas pequeñas del estrato medio presenten desprendimientos. La puntuación para este factor resulta ser de 9 pts.
5. Tipo de sección transversal. Se otorga una calificación de 3 pts, pues es una sección tipo cajón sin fallas en el pavimento.
6. Área de captación de material desprendido. Se tiene que para una ángulo de 50° y una altura de 4.80 m, las dimensiones aproximadas para un área de captación adecuada (cunetones) debería de ser de 1.00 de profundidad (Dr) y 1.00 m de ancho (Wr). Las medidas reales resultan ser tan sólo el ancho y profundidad de las cunetas: 1.00 m de ancho (Wa) X 0.40 m de profundidad (Da). Por lo tanto, de acuerdo a la gráfica 3.1, se tiene que la calificación para el factor de captación es de 9 puntos. Visto de otra forma:

$$Efectividad = \frac{Da + Wa}{Dr + Wr} = \frac{0.40 + 1.00}{1.00 + 1.00} \times 100\% = 70\%$$

7. Vegetación. En el cuerpo no existe, por lo tanto su puntuación es de 81. En la corona existe gran cantidad de arbustos y árboles de pequeña altura, entonces, el punto otorgado para este factor es de 3.
8. Clima
 - Precipitación, la región pertenece a lluvias intensas, por lo que su puntuación se encuentra dentro del rango de 500 a 850 mm, recibiendo un puntaje de 27 pts.
 - Infiltración con humedad, pero no de escurrimiento superficial. Calificación: 9 pts.
9. Geología-Rocas sedimentarias o suelos sedimentarios:
 - Descalce. No existe alta erosión entre los pies de cada estrato: 3 pts.
 - Interestratificación. Presenta dos interestratos del mismo material, menores a 15 cm de espesor y sin ninguna presencia de problemas mayores como erosión a causa de infiltración. Calificación: 3 pts.
 - Presencia de Surcos. No existen, solo pequeños torrentes o fisuras: 3 pts.

Inestabilidad baja. Se presenta con un rango de: < 250 puntos



RESUMEN DE EVALUACIÓN

FACTORES		PUNTUACIÓN
Características del talud	Altura	3
	Mantenimiento/limpieza	9
	Ángulo. Suelo	27
	Irregularidades	9
	Tipo de Sección	3
	Área de Captación	9
	Vegetación. Cuerpo	81
	Vegetación. Corona	3
Clima	Precipitación Media Anual (mm)	27
	Infiltración/agua presente	9
Geología	Descalce	3
	Grado de interestratificación	3
	Presencia de surcos	3
IGE_{cc}		189

Imagen 5.11.- Corte 295 + 600 cuerpo B.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La necesidad del hombre por estimar el riesgo y la confiabilidad de los cortes y terraplenes, es lo que ha propiciado el desarrollo de distintos métodos, procedimientos y técnicas que le ayudan a tener una mayor certidumbre de las posibles causas, consecuencias y efectos que implicaría el que un corte y/o terraplén fallase.
- Debido a los riesgos que corren los usuarios, así como las pérdidas económicas de las empresas encargadas del mantenimiento, se inicia la búsqueda de un método sistemático y lógico capaz de lograr que los niveles de riesgo de los cortes y terraplenes carreteros se

mantengan en los valores más convenientes para ayudar a prevenir peligros para los usuarios así como determinar los costos eficientes de reparación de un tiempo adecuado.

- El IGE resulta ser un indicador fácil de interpretar y de manejar, pues una simple puntuación nos dice con fundamentos teóricos y técnicos que nivel de riesgo tiene el corte y/o terraplén, y en base al presupuesto que se tenga, asignar recursos al que presente mayor riesgo.
- El modelo ha mostrado sus bondades desde una primera evaluación en un tramo piloto, sin embargo, la importancia radica en la voluntad por parte de las administraciones encargadas del mantenimiento, de llevar un seguimiento de cada corte y/o terraplén mediante el registro de su IGE durante diferentes tiempos, para que se vaya creando la base de datos de cada uno de ellos que se tienen en las diferentes redes carreteras y poco a poco ir afinando los factores y rangos de puntuación.
- De acuerdo a la evaluación mediante el IGE_{CC} del tramo piloto, se pudo observar la importancia del factor altura, puesto que en muchas ocasiones en donde no se presentan riesgos altos, dicho factor puede ocasionar puntuaciones altas. En cortes con alturas elevadas, el IGE_{CC} tendrá su variación en el tipo de geología y la forma en que se haya realizado el corte (por ejemplo: el mal uso de explosivos genera una superficie demasiado fracturada e irregular). En cortes pequeños la relación va directamente al material que se presente, es decir, en materiales débiles, un corte al pie de la ladera natural puede ocasionar deslizamientos a causa de la pérdida de apoyo. Así pues, la altura se convierte en el factor de más relevancia y difícil de interpretar, puesto que en muchas ocasiones un corte pequeño supuestamente estable puede ser el que mayores problemas tiene, y un corte que por su gran altura puede causar “temor” y generar puntuaciones altas, en realidad sea un corte debidamente estable. La altura de los cortes y/o terraplenes carreteros se incluye en la metodología por los riesgos que desencadena: alturas muy grandes generalmente llevan consigo problemas de drenaje, falta de cobertura vegetal en la cara para evitar la erosión, mayor riesgo de materiales caídos (lo que ocasiona mayor frecuencia en la limpieza y mantenimiento de la carretera), irregularidades en la superficie por técnicas pobres de excavación, así como necesidad de tener superficies de captación de materiales sueltos.
- En un terraplén, es importante mencionar que los factores de geometría y vegetación son determinantes para tener una puntuación IGE_{TC} alta sin que existan fallas y/o problemas, por ejemplo: si tenemos un terraplén estable, pero éste presenta una altura mayor a 20 m. con una cobertura de vegetación mayor a 60 cm. se obtendría un valor de 162 puntos más los que resulten de la evaluación de los demás factores; caracterizando con solo esos 2 factores un nivel de inestabilidad medio. Por tal motivo, se recomienda que el ingeniero evaluador, en base a su criterio y experiencia para anotar si dichos factores presentan una relevancia importante en la inestabilidad de la estructura terrea al presentarse un caso de estos.
- El rango más pequeño que puede obtenerse en el IGE_{TC} es de 24 puntos para un terraplén totalmente estable sin ninguna falla y/o problemas en su estructura. Cumpliéndose un ángulo de 20 a 40°, una altura menor de 5 metros; en la pared del talud una vegetación densa con cobertura menor a 15 cm. de altura. Sin presencia de erosión ni asentamientos y un buen estado de las obras del drenaje, así como del pavimento.

- Es muy importante mencionar que un corte supuestamente estable o de reciente creación con una altura mayor a 20m debe de oscilar entre un IG_{Ecc} de 195 a 243; partiendo de lo siguiente:
 1. Altura > 20 m: Calificación = 81 pts.
 2. Se supone que el corte no ha tenido mantenimiento: calificación = 3 pts.
 3. El ángulo en los cortes generalmente se hace a 75°: calificación = 81 pts.
 4. Procedimiento de corte adecuado (sin irregularidades en la cara del talud): calificación = 3 pts.
 5. Se supone una sección tipo cajón, sin fallas en el pavimento: calificación = 3 pts.
 6. Para una altura demasiado grande es necesario que exista una debida área de captación para posibles desprendimientos de materiales: calificación = 3 pts.
 7. Todo corte debe ser protegido contra la erosión, por lo que la cobertura vegetal debería de tener una puntuación de 3 pts. (en el cuerpo y la corona).
 8. La precipitación menor a 200 mm: calificación = 3 pts.
 9. Buen sistema de drenaje (sin permitir infiltraciones fuertes), calificación = 3 pts.
 10. En un corte bien cuidado, la geología no debería de presentar ningún tipo de problema: puntuación = 3 X 3 factores = 9 pts.
 11. La suma de todos los factores anteriores presentan un Indicador General de Estabilidad para Cortes Carreteros de 195 pts. Si por algún motivo la precipitación y la cobertura vegetal se encontraran dentro una puntuación de 27, el IG_{Ecc} sería aproximadamente de 243 pts.

6.2 RECOMENDACIONES

- Para realizar dicho estudio, es necesario tomar en cuenta 2 pasos importantes: el desempeño de los activos así como el desempeño de las personas que intervienen en el sistema de gestión de activos, quienes finalmente serán los responsables de alimentar al sistema con la información necesaria. Logrando con esto la obtención de resultados óptimos.
- La aplicación del sistema de evaluación de clasificación del nivel de inestabilidad está diseñado para reflejar el potencial de riesgo creado por los diversos factores en base a la severidad que presenten en un terraplén de un tramo carretero. No se puede utilizar como un modelo matemático para predecir la probabilidad de una falla muy severa en un sitio, si no gestionar y con la información obtenida dar planes de solución.
- El IGE resulta ser una herramienta muy importante en gestión de cortes y terraplenes carreteros, por lo tanto, se debe de tomar en cuenta lo siguiente:
 - Aplicar una y otra vez el sistema de evaluación de cortes y terraplenes mediante el IGE, dará como resultado una mayor experiencia, con la cual podemos tener el juicio para poder modificar los factores y rangos de evaluación que en algún momento se tornen innecesarios o incompletos.
 - Es importante poder llegar a realizar un software que haga más práctica la metodología y permita el uso de una tableta electrónica para realizar los levantamientos en campo, mediante una hoja de cálculo.
 - Debe de existir capacitación para el personal involucrado en el uso del IGE, para uniformizar la forma en que los factores deben de ser levantados y evaluados.

- Se debe de crear la cultura de registrar las precipitaciones en todos los puntos en donde se haya detectado cortes con valores de IGE_{CC} altos, pues con ello se contribuirá (en caso de que exista un derrumbe) a una nueva etapa de información que servirá para determinar a qué cantidad de milímetros de precipitación puede fracasar cierto material en cada corte.
- Los cortes que presenten un rango alto de IGE_{CC} deberán de ser estudiados a fondo mediante la teoría de análisis de estabilidad de taludes para determinar la solución más óptima.
- En situaciones donde el presupuesto sea limitado, se deberá dar prioridad dentro de los cortes y terraplenes evaluados con IGE alto, a aquellos que se encuentren en el tramo con TDPA mayor, para ello es necesario realizar una gráfica de IGE vs TDPA.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES (2005). Evaluation of Slope Assessment System in Predicting Landslides along Roads Underlain by Granitic Formation. Science Publications.
- COMISIÓN ESTATAL DEL AGUA DE JALISCO (CEA JALISCO, 2010). Lago Chapala [en línea]. Disponible en: <<http://www.ceajalisco.gob.mx/chapala.html>> [consultado el 08 de Agosto del 2010).
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA, 2010). Estadísticas del agua en México. [en línea]. Disponible en: <<http://www.cna.gob.mx>> [consultado el 11 de octubre del 2010).
- CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA. Catalogo de Deterioros de Pavimentos Flexibles. Volumen No. 11 2002.
- D.O.K. Lo & W.M. Cheung. Assessment of Landslide Risk of Man-made Slopes in Hong Kong. Geotechnical Engineering Office. The government of the Hong Kong. 2004.
- Duncan J.M. y Buchignani A. L. (1975), An Engineering Manual for Slope Stability Studies. Department of Civil Engineering, University of California.
- Emergency Management Australia. Reducing the Community Impact of Landslides. Manual 24 Vol. 3. 2001.
- ENVIRONMENT WAIKATO TECHNICAL REPORT NO.2009/02. Erosion & Sediment Control. Guidelines for Soil Disturbing Activities. January 2009.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Landfill Manuals. December 2006.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA, 1989). Rock Slopes: Design, Excavation, Stabilization. Publicación No FHWA-TS-89-045.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program. US Department of Transportation. June 2003.
- GAMA CASTRO J.E., CARREÓN FREYRE D., PALACIOS MAYORGA S. Y SOLLEIRO REBOLLEDO E. (1998). Génesis, Identificación y uso de los Suelos de México. Documento técnico No 19, Sanfandila, Querétaro.
- GARNICA, PAUL. Terraplenes. Publicación Técnica. Instituto Mexicano del Transporte.
- Geotechnical Engineering Office. Guide to Slope Maintenance. The government of the Hong Kong. 2003.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO (2002). SRC Rock Mass Classification of Tunnels Under High Tectonic Stress Excavated in Weak Rocks [en línea]. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>> [consultado el 20 de noviembre del 2010).
- GORDON KELLER Y JAMES SHERAR. Guía de campo para las mejores prácticas de Gestión en Caminos Rurales. Instituto Mexicano del Transporte. SCT. México 2005.
- GORSKOV G. Y YAKUSHOVA A. (1970). Geología General. Editorial MIR, Moscú.
- HO CARLTON L. AND NORTON SONJA S. (1991). Development of an Unstable Slope Management System. Washington State Department of Transportation.
- HOEK EVERT (2000). Rock Engineering. Course Notes.

- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA (INE, 2010). Mapas del medio ambiente de México (Emapas) [en línea]. Disponible en: <www.ine.gob.mx> [consultado el 10 de Agosto del 2010].
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI, 2010). Geografía y Geología [en línea]. Disponible en: <www.inegi.org.mx> [consultado el 10 de Agosto del 2010].
- IOWA STATES UNIVERSITY, INSTITUTE FOR TRANSPORTATION. Optimization and Management of Materials in Earthwork Construction. Final Report April 2010.
- JERALD S. FIELD, PH.D. Designing for Effective Sediment and Erosion Control on Construction Sites. Santa Bárbara, CA. 2004.
- KYOJI SASSA, HIROSHI FUKUOKA, FAWU WANG, GONGHUI WANG (2005). Landslides, Risk Analysis and Sustainable Disaster Management. Springer- Verlag Berlin Heidelberg. Printed in Germany.
- MENDENHALL WILLIAM (1989). Introducción a la Probabilidad y Estadística. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F.
- MENDOZA M. Enfoques recientes en la compactación de suelos. Publicación Técnica No. 33, Instituto Mexicano del Transporte.
- NICHOLS GARY (2009). Sedimentology and Stratigraphy. WILEY-BLACKWELL Editorial, second edition.
- Notes for Program on Recent Developments in the Design, Construction and Performance of Embankment Dams, University of California, Berkeley.
- OLIVERA, FERNANDO. Estructuración de vías terrestres. Editorial CECSA. 2ª. Edición. México 1996.
- PAUL H. WRIGHT/ KAREN K. DIXON. Highway Engineering. John Wiley and Sons Inc. Seventh Edition. USA 2004.
- PEÑA DANIEL (2002). Análisis de Datos Multivariantes. Editorial McGraw-Hill.
- PEREZ LOPEZ, CESAR. Técnicas de Análisis Multivariante de Datos. Aplicaciones con SPSS. Editorial Prentice Hall. Madrid, 2004.
- PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROAD CONGRESSES (PIARC). Anticipating the Impact of Climate Change on Road Earthworks.
- PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROAD CONGRESSES (PIARC). Indicators Representative of the Condition of Geotechnical Structures for Road Asset Management.
- R.K.S. CHAN HEAD (2003). Guide to Slope Maintenance. Geotechnical Engineering Office Civil Engineering Department.
- RICO A., DEL CASTILLO H. La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Vol. I y II Ed. Limusa.
- Robert Y. Liang, Ph.D., P.E. Landslide Hazard Rating Matrix and Database, Volume I y II. OHIO Department of Transportation Office of Research and Development. Final report FHWA/OH-2007/18. 2007.
- RUSSELL CHRISTOPHER P., SANTI PAUL, HUMPHREY JOHN D. (2008). Modification and Statistical Analysis of the Colorado Rockfall Hazard Rating System. Colorado School of Mines, Report No. CDOT-2008-7-Final Report.

- SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT), SUBSECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA, DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO CARRETERO INFORMACIÓN DE LAS VÍAS (2010). Información de las vías [en línea]. Disponible en: <www.sct.gob.mx> [Consultado el 08 Agosto del 2010].
- SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT), SUBSECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA, DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO CARRETERO INFORMACIÓN DE LAS VÍAS (2010). Aplicaciones [en línea]. Disponible en: <www.sct.gob.mx> [consultado el 08 de Agosto del 2010].
- SHYAMAL KUMAR BHATTACHARYYA. Highway Embankment Design in Bangladesh. School of Civil Engineering. The University of Birmingham. 2009.
- SMITH, ROGER; DARTER, MICHAEL Y HERRIN, STANLEY. Highway Pavement Distress Identification Manual for Highway Condition and Quality of Highway Construction Survey. Washington: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- SOUTH CAROLINA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (2001). Maintenance Assessment Program.
- SUAREZ D. JAIME. Control de Erosión en zonas tropicales. División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia 2001.
- SUAREZ D. JAIME. Deslizamientos: Análisis Geotécnico. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Bucaramanga, Colombia 1998.
- THE CENTRAL FEDERAL LANDS HIGHWAY DIVISION (CFLHD). Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems. September 2003.
- TUCKER MAURICE E. (2003). Sedimentary Rocks in the Field. Department of Geological Sciences, University of Durham, UK. WILEY editorial. Third edition.
- U.S. Army Corps of Engineers. Engineering and Design Geotechnical Investigations. Washington, DC 2001.
- U.S. Army Corps of Engineers. Engineering and Design Geotechnical Investigations. Disponible en: www.lrh.usace.army.mil/publications/ [consultado en Septiembre y Octubre 2010].
- Washington, DC 2001.
- WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Maintenance Manual. October 2010.
- WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Disponible en: <www.wsdot.wa.gov> [consultado el 07 de Septiembre del 2010].
- WYLLIE DUNCAN C. & MAH CRISTOPHER W. (2005). Rock Slope Engineering, Civil and Mining. 4th edition.