

Banco Mundial
Práctica Global para Transporte y TIC
Región América Latina y El Caribe

**Mejorando la confiabilidad de
la red vial del Perú**



Abril, 2016

Vicepresidente: Jorge Familiar Calderón
Director de País: Alberto Rodríguez
Gerente de Práctica: Aurelio Menéndez
TTL: Cecilia Briceño-Garmendia

Reconocimientos

El presente informe fue preparado por un equipo liderado por Cecilia Briceño-Garmendia y compuesto por J. Luis Guasch y Luz Díaz (componente logístico), y Julie Rozenberg y Laura Bozanigo (componente de adaptación de las redes viales al cambio climático); con colaboración en diferentes puntos de Harry Moroz, Xijie Ly, Adam Stern, Griselle Vega, Theresa Osborne, Diana Cubas, Carolina Rendon y Robin Carruthers. Se debe dar un reconocimiento especial a Raúl Andrade, Carlos Córdoba y Rodrigo Barrios, el equipo técnico de APOYO Consultoría, quienes lideraron el trabajo de campo. El equipo trabajó bajo la guía de Aurelio Menendez, Marisela Montoliu-Muñoz y Alberto Rodríguez. El equipo también agradece los valiosos comentarios de los revisores Marianne Fay, Marialisa Motta, Anca Dumitrescu, Daniel Lederman, Baher El-Hifnawi, y Jean-Francoise Arvis; y el apoyo de Pedro L. Rodríguez y Karina Oliva. Agradecimiento particular a Nancy Itami Okumura y Mara Elena La Rosa por su impecable apoyo en la organización de los talleres y eventos.

El equipo reconoce y está agradecido por la muy estrecha colaboración del Gobierno del Perú bajo el liderazgo y coordinación de Liliana Honorio y Francisco Ruiz con la colaboración de María Elena Lucana (MINCETUR). Otros colaboradores del Gobierno incluyen Pedro Monzón, Fernando Cerna y Ana Vera (MINCETUR), Carol Flores (PROMPERU), Omar Linares, Ivo Diaz, Guillermo Chávez, Javier Hervias, Enrique Llocella, Oscar Salcedo, Natalia Teruya y Carlos Lozada (MTC), Martha Huaman, Gerald Toskano y Nely Romero (Provias Decentralizado), y Carlos Azurin (Consejo Nacional de Competencia), Fernando Málaga, Cesar Villareal Pérez y Aleksandr Lopez Juarez (CENEPRED), Lionel Fidel Smoll y Susana Vilca Achata (INGEMMET), y Laura Avellaneda (MINAM).

Los resultados de este trabajo se beneficiaron de las discusiones con Hon. Ex. Magali Silva (Ministra de MINCETUR), Hon. Ex. Edgar Vásquez (Viceministro de MINCETUR), y Hon. Ex. Carmelo Henry Zaira (Viceministro de Transporte).

El contenido, alcance y metodología del informe también se discutieron en detalle y fueron validados en 3 talleres revisando la metodología y los resultados en Noviembre 2014, Abril 2015, Agosto-Septiembre 2015 con la participación de MINCETUR, Ministerio de Transporte y Comunicaciones, MINAGRI – Ministerio de Agricultura y Riego, MINAM – Ministerio del Ambiente, PRODUCE – Ministerio de Producción, CNC - Consejo Nacional de Competitividad, SUNAT – Superintendencia Nacional de Aduanas y Administración Tributaria, PROMPERU, INDECOPI, Provias Nacional, Provias Descentralizado, SEDAPAL, MINEN, CENEPRED, INDECI, SENAMHI, PROINVERSIÓN - Agencia de Promoción de la Inversión Privada, OSITRAN - Organismo Supervisor de la Inversión en Infraestructura de Transporte de Uso Público y Ministerio de Economía y Finanzas. Del sector privado, AAAP – Asociación de Agentes de Aduana, AGAP - Asociación de Gremios Agroexportadores del Perú, ADEX – Asociación de Exportadores, APACIT - Asociación de Transporte y logística, ASPPOR - Asociación Peruana de Operadores Portuarios, ASMARPE - Asociación Marítima del Perú, CCL – Cámara de Comercio Lima, COMEX –Sociedad de Comercio Exterior del Perú, CONUDFI - Consejo Nacional de Usuarios del Sistema de Distribución Física Internacional, CONFIEP - Confederación Nacional De Instituciones Empresariales Privadas, FRIO AEREO, y SNI – Sociedad Nacional de Industria.

La revisión técnica del componente técnico sobre la adaptación de redes viales al cambio climático se realizó como parte del estudio regional *Redes Viales, Accesibilidad y Resiliencia: Los Casos de Colombia, Ecuador y Perú*, en colaboración con la Oficina del Economista en Jefe del Vicepresidente de América Latina y el Caribe del Banco Mundial.

El presente estudio recibió un financiamiento generoso de la Secretaría de Estado para Asuntos Económicos – SECO, bajo el liderazgo de Martín Peter y con la coordinación interna dentro del Grupo del Banco Mundial de Álvaro Quijandría.

Contenido

| | |
|---|----|
| Metodología | 6 |
| Un enfoque de red para la medición de la criticidad | 6 |
| La Matriz de las decisiones | 7 |
| Relaciones y datos (R) | 8 |
| Red vial | 8 |
| HDM4 y SIG | 10 |
| Datos de desastres | 11 |
| Palancas de política (L) - o Intervenciones | 12 |
| Métricas (M) | 13 |
| Costos | 13 |
| Costos para la Economía | 14 |
| Costos de las intervenciones | 15 |
| Costos sociales | 16 |
| Incertidumbres | 16 |
| Eventos climáticos | 16 |
| Redireccionamiento del tráfico | 18 |
| Impacto del nivel de agua en la carretera | 19 |
| Los resultados | 20 |
| ¿Cómo podemos elegir las carreteras más cruciales en la red? Elección de corredores | 20 |
| Selección de Enlaces | 21 |
| Selección de enlaces críticos expuestos a eventos extremos | 24 |
| Análisis económico | 25 |
| ¿Cuáles son las pérdidas anuales previstas vinculadas a interrupciones por inundación en tres clústeres críticos de enlaces en la red? | 26 |
| ¿Cuál es la mejor manera en que podemos reducir estas pérdidas? | 27 |
| Conclusiones y recomendaciones de política | 32 |
| Referencias | 33 |
| Anexos | 33 |

Introducción

Los altos costos de transporte están entre los factores más disruptivos que contribuyen a debilitar los nexos entre los mercados. En América Latina—donde las economías dependen en gran parte de las materias primas¹ y en los modelos económicos y demográficos desarrollados en torno a las agrupaciones urbanas a menudo lejos de las poblaciones rurales dispersas²—la actividad económica y movilidad de la población dependen en gran medida del transporte. Los costos de transporte pueden representar hasta el 70 por ciento de los costos comerciales asociados a las exportaciones e importaciones intrarregionales (Moreira y otros, 2013).

La economía exportadora del Perú también depende grandemente de las carreteras. La mayoría de los productos exportados se transportan por carretera desde las diversas regiones a los principales puertos de exportación. Sin embargo, la topografía y el clima del Perú presentan serios desafíos a sus 13 000 km de redes viales. Las altitudes medias oscilan desde menos de 500 metros sobre el nivel del mar en las regiones de la costa (“Costa”) y la región Amazónica (“Selva”), a más de 3,000 metros en las áreas montañosas (“Sierra”). Las temperaturas extremas y las copiosas lluvias, en particular, pueden conducir al cierre completo de carreteras debido a inundaciones y deslizamientos de tierra (Ministerio de Transporte y Comunicaciones - MTC, 2005). En 1982-83 y en 1997-98, fenómenos severos de El Niño provocaron intensas lluvias y consecuentemente inundaciones repentinas y deslizamientos de tierra con altas pérdidas. En el primer evento, por ejemplo, la mayoría de los puentes en las áreas norteñas de la carretera Panamericana a lo largo de la costa peruana, fueron destruidos. A la fecha, no todos los puentes se han reconstruido y existen aún muchas estructuras temporales. Estas interrupciones son un componente importante de altos costos de logística para los *commodities* de exportación.

Por tanto, los responsables de las políticas deben asegurar que la red vial se mantenga confiable. Por supuesto, la mejor solución sería intervenir en la totalidad de la red. Sin embargo, esto no es posible ni necesario. La solución más eficiente es proteger los segmentos más críticos de la red, aquellos, por ejemplo, con un mayor tránsito, y/o una mayor importancia socio-económica. Clasificar los corredores en base a su criticidad puede fomentar las prácticas de priorización, y, finalmente, permitir el análisis de los impactos económico y de desarrollo de intervenciones y decisiones de políticas específicas. Este problema ha sido muy poco investigado y documentado en la literatura económica.

Aun así, no todos los enlaces críticos son vulnerables a las amenazas naturales u otros riesgos. Por lo tanto, los responsables de las políticas deben saber cuál es la mejor forma de intervención para cada una de las carreteras críticas, dado el riesgo que enfrentan. Si conocieran con certeza la frecuencia, ubicación y magnitud de estos eventos, podrían elegir con facilidad la mejor localización y el tipo de inversión para proteger la red de quedar interrumpida. Sin embargo, la frecuencia, severidad y duración de estos desastres son difíciles de predecir con precisión.

¹ Por ejemplo, la edición de enero de 2015 de las Perspectivas económicas globales del Banco Mundial estima que una disminución de un punto porcentual en el crecimiento de China está asociada con una disminución de 0,6 punto porcentual en el crecimiento en ALC (Banco Mundial 2015).

² La igualdad de oportunidades y el acceso a la infraestructura es, en gran parte, un resultado de si se vive en una zona urbana o rural (de Barro y otros 2008; Banco Mundial 2009). Como Fay y Morrison (2007) señalan, “Teniendo en cuenta que la pobreza suele ser mucho mayor en el campo, las tasas inferiores de acceso rural explican gran parte (aunque de ninguna manera todas) las amplias disparidades en la cobertura de infraestructura entre latinoamericanos pobres y ricos” (Fay y Morrison 2007).

El desafío de abordar los riesgos de interrupción en una red vial es múltiple. Primero, se necesitan enormes conjuntos de información para estimar con precisión la probabilidad de que un evento natural extremo (lluvia torrencial, terremoto) ocurra en un lugar en particular. Incluso si los datos están disponibles, con el cambio climático existe una gran incertidumbre en cuanto a la magnitud de los cambios medios y extremos en las precipitaciones que puedan suceder en cualquier país o región. Esta incertidumbre se pronuncia aún más a nivel local, a la escala necesaria para los proyectos de carreteras – la reducción de los datos climáticos tiende a amplificar la incertidumbre en lugar de disminuirla. Para las interrupciones que no están vinculadas con eventos naturales, tales como huelgas o tránsito intenso no planificado, las probabilidades también son imposibles de estimar. Por otra parte, el impacto de los desastres naturales depende de dónde ocurren – su impacto es exacerbado si la carretera es crítica para un sector económico, para una comunidad, o para toda la red. También empeora si la carretera no tiene un buen mantenimiento, si la deforestación hace al terreno propenso a deslizamientos, o si no se implementa una respuesta urgente de manera oportuna para hacer que la carretera esté operativa nuevamente en corto tiempo. Ya sea que una carretera crítica pueda repararse en pocas semanas o en varios meses, puede cambiar dramáticamente las consecuencias económicas de una interrupción. Todos estos aspectos deben tomarse en cuenta a fin de priorizar adecuadamente las intervenciones en una red vial, pero son difíciles de predecir al tomar la decisión. Estas incertidumbres también hacen difícil predecir el costo económico de las interrupciones de carreteras y, por lo tanto, elegir dónde intervenir en una red vial y evaluar las compensaciones entre diferentes opciones.

Existe todavía otro desafío para la planificación, el cual se relaciona con el alcance del análisis. Tradicionalmente, el enfoque se ha centrado en el nivel del proyecto. Por ejemplo, OSITRAN pide a las concesionarias y al Ministerio enviar análisis económicos para cada intervención individualmente. Sin embargo, este alcance no ve los beneficios de las intervenciones en todo el sistema, lo cual en algunos casos puede llevar a diferentes elecciones en conjunto sobre dónde intervenir. Un alcance del sistema también permite la introducción de diferentes métricas de decisión aparte de las puramente financieras, distintas del número de vehículos que utilizan la carretera – la métrica comúnmente utilizada.

Por lo tanto, a fin de planificar para la confiabilidad de la red vial, es de vital importancia identificar: los enlaces críticos de una red cuya ruptura la economía no pueda solventar, cuáles son los márgenes de ganancia de transporte y qué alternativas a los enlaces críticos se imponen en la economía y en la conectividad de un país. Este trabajo tiene como objetivo ayudar a los gobiernos a enfrentar estos desafíos. Propone una metodología para establecer prioridades dentro de la red peruana de carreteras, tomando un alcance a nivel de todo el sistema, y para ayudar a diseñar intervenciones que puedan reducir su vulnerabilidad, dadas las incertidumbres relacionadas con las amenazas y sus impactos. Específicamente, ayuda a responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo podemos identificar las carreteras más cruciales en la red nacional?
2. Dadas las incertidumbres existentes ¿Cómo podemos evaluar la vulnerabilidad de estas carreteras críticas hacia eventos extremos?
3. ¿Cómo podemos elegir entre opciones disponibles ex ante y evaluar su efectividad en relación a intervenciones ex post, para reducir estas vulnerabilidades?

El estudio revela que la interrupción de algunos enlaces puede dar como resultado graves pérdidas económicas para el Perú, y que tales enlaces críticos están expuestos a inundaciones, deslizamientos de tierra y/o marejadas. Este es particularmente el caso en tres clústeres de carreteras: La Carretera Central, Piura, y la Panamericana en el sur del país. Las primeras dos son corredores de exportación críticos. Las

opciones más rentables son específicas para estos conjuntos. En Piura y en la Panamericana, construir una carretera a prueba de inundaciones es más rentable que las demás opciones. En cambio, en la Carretera Central, la redundancia en la construcción es la opción más sólida.

Metodología

El Banco Mundial está adaptando y aplicando una serie de alcances y herramientas de última tecnología – etiquetados como Toma de Decisiones en Situaciones de Incertidumbre (DMU, por sus siglas en inglés) – para manejar grandes incertidumbres y desacuerdos en los proyectos del Banco. El objetivo es promover la sostenibilidad y la resiliencia en los países clientes. Un análisis tradicional, algunas veces llamado “Predecir luego Actuar”, gira en torno a predecir con precisión el clima y otras condiciones y luego lograr un consenso sobre qué traerá el futuro. Esto no funciona para cambios climáticos a largo plazo y sitios específicos de proyecto debido a los diferentes desafíos antes mencionados.

Pero sí existen métodos innovadores para manejar los riesgos a largo plazo y las incertidumbres para los proyectos. La Toma de Decisiones Sólidas (RDM, por sus siglas en inglés) es tal como un enfoque. La RDM es una metodología iterativa, cuantitativa, de apoyo a la decisión diseñada para ayudar a los responsables de las políticas a identificar las estrategias que sean sólidas, que satisfagan los objetivos de los tomadores de decisiones en muchos futuros plausibles, en lugar de ser óptima en cualquier estimación mejor y única del futuro. RDM pregunta, “Cuáles son las fortalezas y limitaciones de nuestras estrategias, y qué podemos hacer para mejorarlas?” Para dar respuesta a esto, RDM se apoya en un concepto simple. En lugar de utilizar modelos e información para evaluar planes bajo un único o un grupo de escenarios, RDM ejecuta modelos sobre cientos de escenarios diferentes. Los análisis estadísticos de la ejecución de estos modelos identifican las condiciones claves bajo las cuales cada estrategia satisface o no satisface los objetivos de los tomadores de decisiones. Las visualizaciones ayudan a los tomadores de decisiones a entender cuán sólidas son las diferentes estrategias al hacer una evaluación comparativa de aquellas condiciones claves con la gama de resultados plausibles. También ayudan a comparar estrategias junto con otras dimensiones, tales como costo, factibilidad técnica, y aceptabilidad social (Lempert et al. 2013). Lo que es más importante, enfoques como la RDM no son modelos nuevos. Más bien, ellos utilizan los datos y modelos de manera transparente, revelando suposiciones cruciales a menudo ocultas en análisis y volviendo a poner las decisiones en las manos de los tomadores de decisiones. Tales enfoques también promueven el consenso – los tomadores de decisiones pueden ponerse de acuerdo en un plan sin estar de acuerdo con las predicciones de lo no predecible.

Enfoques como este se han aplicado con más frecuencia en los Estados Unidos para riesgo de inundaciones y planificación de uso de suelos (Fischback, 2010). El Banco Mundial recientemente ha estado utilizando metodologías de DMU en diferentes proyectos, tales como las inversiones de energía hidroeléctrica en Nepal (Bonzanigo et al. 2015), inversiones en agua y energía en África (Cervigni et al., 2015), planificación de recursos de agua en Lima, Perú (Kalra et al., 2015; <https://goo.gl/BRojPW>), y manejo de humedales en Colombo, Sri Lanka (próximo trabajo). Pero todavía no se ha probado en redes viales.

Un enfoque de red para la medición de la criticidad

En el presente estudio, utilizamos un enfoque de red para evaluar y abordar la vulnerabilidad de algún subconjunto del sistema de carreteras. Dada la complejidad y el tamaño de las redes viales nacionales, una evaluación de cada enlace individual es costosa en términos de necesidades y demandas de datos computacionales. Más importante aún, una evaluación de toda la red es innecesaria: criterios de

criticidad cuidadosamente seleccionados pueden reducir una red vial de decenas de miles de enlaces a varios cientos que merezcan un análisis más detallado.

El impacto que una carretera individual (de manera más general un segmento de red) tenga en la accesibilidad agregada del país o una región, dará un sentido de la importancia relativa de esa carretera individual en toda la red o, en otras palabras, su criticidad. *Los enlaces críticos* son, entonces, los de mayor importancia para el funcionamiento de toda la red. Este funcionamiento puede ser evaluado utilizando criterios geopolíticos, sociales y/o económicos. En el presente estudio, este es medido por el aumento en el costo agregado al usuario de la carretera y los kilómetros adicionales. Los costos económicos que resultan de la interrupción de un enlace son, por lo tanto, el tráfico multiplicado por los costos del usuario de la carretera. Para la evaluación del “nivel” de criticidad, se utiliza la técnica de interdicción para estimar el impacto económico y social de la interrupción o degradación de un enlace en la red global.

Clasificar los corredores con base en su criticidad puede fomentar las prácticas de priorización, y, finalmente, permitir el análisis de los impactos económico y de desarrollo de intervenciones y decisiones de políticas específicas.

Por lo tanto, unimos el análisis de la red y las herramientas de RDM para identificar y abordar las vulnerabilidades de la red vial peruana. La Matriz que se muestra a continuación explica los elementos analíticos.

La Matriz de las decisiones

Los componentes claves del análisis centrado en las decisiones se organizaron utilizando una matriz para enmarcar el problema o marco “XLRM” (Lempert et al., 2003). Este marco fue el centro de la discusión con los grupos de interés y ayudaron a construir un entendimiento mutuo de los desafíos de la red vial, interrupciones potenciales, sus costos y posibles opciones.

Las letras X, L, R y M se refieren a cuatro categorías de factores:

- Palancas de políticas (L) son acciones que los tomadores de decisiones deben considerar, en este caso la inversión disponible para reducir la vulnerabilidad de la red vial ante los desastres naturales;
- Las incertidumbres exógenas (X) son factores como el cambio de clima y el tiempo para reconstruir la carretera que pueden afectar la capacidad de las acciones para lograr las metas de los tomadores de decisiones y que no están directamente bajo su control;
- Métricas (M) son las normas de desempeño utilizadas para evaluar si una elección de palancas de políticas logra o no las metas de los tomadores de decisiones, por ejemplo, el costo de utilizar la red para los usuarios; y
- Relaciones (R), generalmente representadas por modelos de simulación, define cómo funcionan las palancas de política, según lo medido por las métricas, bajo las diferentes situaciones de incertidumbre.

La matriz XLRM desarrollada para este estudio se resume en la Tabla 1. Esta sección describe los modelos (R) que cuantifican las relaciones entre los factores, las palancas de política (L) en consideración, la métrica (M) utilizada para juzgar la eficacia de dichas políticas, y por último, las situaciones de incertidumbre (X).

Tabla 1 Marco XLRM de factores clave en el presente análisis

| Incertidumbres (X) | Palancas de Política (L) |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Cambio climático (intensidad y frecuencia de eventos de lluvias) • Impacto de El Niño • Duración de la interrupción • Porcentaje de tráfico que puede pasar por la carretera interrumpida | <ul style="list-style-type: none"> • Intervienen después del desastre para restaurar la carretera a su estado original • Mayor redundancia • Intervienen ex ante en la primera mejor carretera <ul style="list-style-type: none"> ○ Túneles ○ Mejor mantenimiento ○ Mejoramiento de carreteras |
| Relaciones y datos (R) | Métrica (M) |
| <ul style="list-style-type: none"> • Red vial, mapeada en un modelo SIG origen-destino • HDM-4 para costos de usuario de carretera • Datos de desastres naturales <ul style="list-style-type: none"> ○ Mapas de inundaciones de Deltas ○ Datos de deslizamientos de tierra de INGEMMET | <ul style="list-style-type: none"> • Costos de usuario de carretera • Tiempo de viaje • Km cubiertos • Costo total (tomando en cuenta el tránsito) • Pérdidas anuales proyectadas • Costo de intervenciones (inversión inicial más operaciones y mantenimiento) |

Relaciones y datos (R)

Red vial

El conjunto de datos georreferenciados de redes viales (Carreteras SIG) para Perú se obtuvo del Ministerio de Transporte y Comunicaciones. El conjunto de datos cubre el 100% de la red, pero carece de información sobre el número de carriles y el tránsito (**Tabla 2**) En la red primaria, solo alrededor de la mitad de la red primaria está en buenas condiciones y 16 por ciento en malas condiciones (**Tabla 3**). Sin embargo, el 85 por ciento de las carreteras del Perú están pavimentadas (**Tabla 4**).

Tabla 2. Cobertura de Datos de Carreteras SIG

| Tipo de red | Cobertura SIG de KM reportados de la red % | Tipo de Superficie (Pavimentada/No pavimentada) | Condición (Buena/Regular/Deficiente) | No. de carriles | Tránsito |
|-------------|--|---|--------------------------------------|-----------------|----------|
| Primaria | 100 | √ | √ | ---- | √ |
| Secundaria | 100 | √ | √ | | Alguno |
| Terciaria | 100 | √ | √ | ---- | ---- |

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

Nota: SIG = sistema de información geográfica.

Tabla 3. Condición como un porcentaje de la red primaria total

| | Buena % | Regular % | Mala % | No hay info. % |
|------|------------|--------------|-----------|----------------------|
| Perú | 55 | 20 | 16 | 9 |

Fuente: Banco Mundial con base en datos SIG.

Tabla 4. Tipo de superficie como un porcentaje de la red primaria total

| | Pavimentada % | No pavimentada % | No hay info. % |
|------|------------------|------------------------|----------------------|
| Perú | 85 | 8 | 7 |

Fuente: Banco Mundial con base en datos SIG.

La creación de una red en funcionamiento fue un reto (Ver Anexo). La construcción de una red vial SIG consistente que se pueda utilizar tanto en el país como a nivel regional incluye la normalización de atributos antes de fusionar subconjuntos más pequeños en un conjunto integrado. Una vez que se ha armado el conjunto de datos del país, las características viales se deben extender a los países vecinos y recortarse sobre la base de las líneas de los límites delineados por el archivo de formas del Polígono de Límites de Países del Banco Mundial. Con fines de modelado de la red, se aplanan la red integral para asegurar que los “nodos” estén especificados en los cruces entre arcos. Eso permite que los vehículos cambien de un arco a otro cuando se modela en enrutamiento. Luego la red se disuelve para reducir el número de características que son contiguas y que tienen atributos idénticos.

Para la topografía, el estudio utiliza el Modelo Digital de Elevación (MDE) y clasifica el país en 15 geografías más granulares con base en la elevación y las irregularidades del terreno, la cual es la elevación máxima menos la elevación mínima de una zona definida dividida por la mitad de la longitud de la zona (Meybeck y Vörösmarty 2001). El Perú cuenta con terrenos muy accidentados de los cuales, 74 por ciento del área del terreno tiene colinas o es montañoso (Tabla 5).

Tabla 5. Clases de terreno y porcentaje de área terrestre Perú

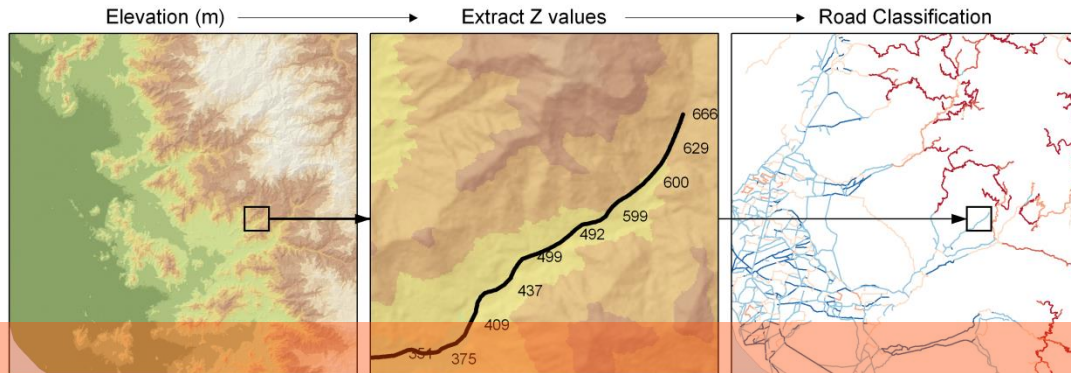
| Clase | Descripción | Perú |
|-------|---------------------------------|-------|
| 1 | Llanuras | 0.11 |
| 2 | Llanuras de altitud media | 0.00 |
| 3 | Llanuras de gran altitud | 0.00 |
| 4 | Tierras bajas | 10.92 |
| 5 | Tierras bajas irregulares | 17.41 |
| 6 | Plataformas (mesetas muy bajas) | 1.48 |
| 7 | Mesetas bajas | 0.05 |
| 8 | Mesetas de altitud media | 0.00 |
| 9 | Mesetas altas | 0.72 |
| 10 | Mesetas muy altas | 0.14 |
| 11 | Colinas | 20.83 |
| 12 | Montañas bajas | 7.44 |
| 13 | Montañas de altitud media | 10.37 |
| 14 | Montañas altas | 16.81 |
| 15 | Montañas muy altas | 13.70 |

Fuente: Recopilación del autor.

Otro elemento que se debe considerar, debido a su significativo impacto en el diseño de las redes viales y planificación de intervenciones de enlaces específicos de carreteras, es el tipo de terreno. En el presente estudio, las características del terreno para cada tramo de la red vial se obtuvieron utilizando la herramienta SIG *extracción de característica lineal*. La extracción de característica lineal incluye el extraer los datos de elevación a intervalos fijos a lo largo de la línea de la red vial y calcular directamente las características de la carretera requeridas para las categorías topológicas que se utilizarán. Luego se

calcularon las clases de terreno haciendo supuestos acerca de las características claves de la carretera para cada enlace: Ascenso y caída, número de ascensos y caídas, curvatura horizontal, súper elevación y altitud.³ Los pasos básicos requeridos para este enfoque se presentan en la **Figura 1**.

Figura 1. El enfoque de extracción de características lineales para definir tipos de terreno



Fuente: Banco Mundial con base en datos SIG.

Una vez que las características de la carretera se calculan, cada tramo de carretera se asigna a uno de siete clases generales de geometría de carreteras. Para efectos del presente estudio, la clase de terreno se refiere a siete terrenos o categorías topológicas diferentes: recto y nivelado, mayormente recto y ligeramente ondulado, sinuoso y generalmente nivelado, sinuoso y ligeramente ondulado, sinuoso y severamente ondulado, serpenteante y ligeramente ondulado, y serpenteante y severamente ondulado.

HDM4 y SIG

Un punto de partida para estimar las distancias económicas es cambiar de las distancias euclidianas a distancia de la red y, en última instancia, a costo, velocidad y distancias en tiempo como es percibido por el usuario. Es en este contexto que el análisis SIG se combina con el enfoque de ingeniería más tradicional de estimación de los costos de operación del usuario.

Para el estudio, el Modelo de Desarrollo y Gestión de Carreteras (HDM-4) proporciona estimaciones para dos métricas clave: costos de usuarios de la carretera (RUC, por sus siglas en inglés) y velocidad (del vehículo). Los RUC se definen como el costo unitario de utilización de una carretera expresado en dólares por tonelada-kilómetro. Los costos del usuario de la carretera (RUC) constan de dos componentes: costos de operación vehicular (VOC, por sus siglas en inglés), los cuales reflejan el costo de operar un vehículo, y el valor de los costos de tiempo (VOT, por sus siglas en inglés), los cuales reflejan el costo de tiempo asociado con el uso de un vehículo.⁴ HDM-4 también calcula la velocidad prevista del vehículo en kilómetros por hora para un enlace de carretera dado.

³ También se probó un método alternativo conocido como *clasificación de paisajes* para este ejercicio. Resultó que el método de extracción de características lineales representa las características de la carretera con mayor exactitud con supuestos de datos ligeramente menos estrictos. Para ver los detalles, vea el anexo 3.

⁴ Los COV incluyen el costo de combustible, lubricantes, neumáticos, piezas de mantenimiento y mano de obra de mantenimiento, tiempo de la tripulación, depreciación, intereses y gastos generales. Los VOT incluyen el costo del tiempo de los pasajeros y el costo del tiempo de la carga. Cada uno de estos componentes se calcula por separado como un rendimiento del modelo HDM-4.