

EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ECONÓMICAS DERIVADAS DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN TÉRMICA (EL CASO DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL)

ASSESSMENT OF ECONOMIC LOSSES FROM THERMAL EROSION PROCESSES (THE CASE OF ROAD INFRASTRUCTURE)

Svetlana Badina^{1*}, Daria Bogatova¹, Aleksandra Pryadilina¹, Lidia Minchenkova²

RESUMEN

El objetivo de este artículo es desarrollar una metodología para evaluar el costo de reposición de las carreteras con el fin de pronosticar los daños derivados de peligros naturales, aplicándola como ejemplo al proceso de termoerosión. Como caso de estudio se eligió el Distrito Autónomo de Yamalo-Nenets, una de las regiones árticas de Rusia situada en la zona de permafrost, cuyo territorio está en gran medida expuesto a procesos de termoerosión. El problema de la intensificación de los procesos termoerosivos se ha agudizado significativamente en los últimos años debido a los cambios climáticos. En la investigación se utilizaron métodos estadísticos, el enfoque normativo y técnicas de análisis geoinformático. Como resultado del estudio, se determinó que el tamaño máximo del posible daño para las carreteras pavimentadas del Distrito Autónomo de Yamalo-Nenets en zonas de alto riesgo de termoerosión asciende a aproximadamente 1.964 miles de millones de dólares estadounidenses, y que el 39 % de todas las carreteras de la región se encuentran en áreas de alto riesgo. Esta cifra corresponde a una estimación teórica obtenida sobre la base del supuesto de un escenario extremo de pérdida total (100 %) de la infraestructura vulnerable. Esta línea de investigación reviste gran relevancia en el contexto de los cambios climáticos y sus consecuencias, así como de la necesidad de elaborar planes de adaptación adecuados. Los resultados pueden ser utilizados en el desarrollo de planes de adaptación al cambio climático y en documentos de planificación territorial estratégica a diferentes niveles.

Palabras clave: Riesgos naturales, daño económico, Ártico, cambio climático, permafrost, procesos peligrosos del permafrost, termoerosión, Rusia, infraestructura vial.

ABSTRACT

The objective of this article is to develop a methodology for assessing the replacement cost of roads in order to forecast damages resulting from natural hazards, applying it as an example to the process of thermoerosion. The Yamalo-Nenets Autonomous District was selected as a case study. This is one of the regions of the Russian Arctic located in the permafrost zone, the territory of which is significantly exposed to thermoerosion processes. The problem of intensifying thermoerosive processes has worsened significantly in recent years due to climate change. The research employed statistical methods, a normative approach, and geoinformation analysis techniques. The study found that the maximum potential damage to paved roads in the Yamalo-Nenets Autonomous District in areas of high thermoerosion risk amounts to approximately 1.964 billion U.S. dollars, and that 39% of all roads in the region are in high-risk areas. This value corresponds to the theoretical estimate obtained based on the assumption of an extreme scenario of complete loss (100%) of the vulnerable infrastructure. This line of research is highly relevant in the context of climate change and its consequences, as well as the need to develop adequate adaptation plans. The results can be used in the preparation of climate change adaptation plans and strategic territorial planning documents at various territorial levels.

Keywords: natural hazards, economic damage, Arctic, climate change, permafrost, dangerous permafrost processes, thermo-erosion, Russia, road infrastructure.

¹ Laboratorio de Geoecología del Norte, Facultad de Geografía, Universidad Estatal de Moscú M. V. Lomonósov

² Universidad Bernardo O'Higgins, Escuela Administración y Negocios

* Autor de correspondencia: bad412@yandex.ru

INTRODUCCIÓN

En el mundo, en las últimas décadas ha crecido de manera significativa el número de desastres naturales y los daños derivados de ellos, y en el contexto del cambio climático se prevé que esta tendencia se intensifique (Botzen et al., 2019; Coronese et al., 2019; Done, 2012; Porfiriev, 2012). El territorio de Rusia está altamente expuesto a los cambios climáticos. Sus consecuencias, tanto positivas como negativas para la sociedad y la economía, ya se manifiestan activamente en su territorio (Badina & Pankratov, 2022; Porfiriev et al., 2025). En este contexto, cobran gran importancia las investigaciones científicas relacionadas con la predicción de riesgos y daños por peligros naturales, incluidos los derivados del clima. Contar con información detallada sobre las amenazas probables y sus consecuencias ayuda a establecer medidas preventivas y de adaptación bien fundamentadas, reduciendo significativamente la magnitud de los impactos negativos (Anisimov & Badina, 2024).

La infraestructura vial forma parte de la infraestructura crítica (Critical infrastructure..., 2007) por lo que la interrupción de su funcionamiento, causada en particular por emergencias de origen natural, puede afectar negativamente la seguridad de la población y de la actividad económica en todos los niveles territoriales.

En Rusia, la infraestructura vial está expuesta a un gran número de peligros naturales, principalmente a procesos meteorológicos, hidrológicos y geológicos peligrosos (Petrova, 2020; Trofimenko et al., 2017). La situación varía considerablemente en función de la región y de sus condiciones naturales y climáticas.

De este modo, se plantea la necesidad de desarrollar una metodología para la estimación de los daños máximos probables en infraestructuras viales, que sea asimismo susceptible de aplicación en el análisis del riesgo asociado a otros tipos de amenazas naturales.

El 63 % del territorio de Rusia se encuentra en la zona de distribución del permafrost, el cual está experimentando transformaciones activas como consecuencia de los cambios climáticos y antropogénicos (Melnikov et al., 2022).

El área de investigación abarca varios tipos de distribución de los suelos permafrost (Atlas, 2004). La parte norte del territorio, que incluye las penínsulas de Yamal y Gydan, así como la parte norte de la península de Taz, está caracterizada por una zona de distribución continua de suelos permafrost, es decir, los suelos helados están presentes en todas partes y su espesor alcanza aproximadamente entre 200 y 400 m. Los taliks continuos y discontinuos están asociados con los cauces de los grandes ríos. La parte central del territorio investigado se caracteriza por tipos de permafrost isleños y discontinuos, lo que significa que los suelos helados se encuentran en áreas separadas que ocupan entre un 20 y un 80 % de la zona. En el sur de la región predomina el tipo de distribución masiva-isleña de los suelos permafrost, donde los bloques helados se presentan en grandes áreas aisladas que cubren el 50 % del área. En la parte suroeste del territorio, se encuentran áreas con pequeños islotes y capas discontinuas de suelos helados, lo que indica una zonificación aún más fragmentada de la criolitosfera. En general, de norte a sur, se observa una disminución gradual de la continuidad del permafrost y una transición de una capa continua a formas discontinuas e isleñas de su distribución, lo que tiene una gran importancia para las condiciones geológico-ingenieriles y el diseño de estructuras.

La evaluación de los daños a la infraestructura provocados por la modificación de las condiciones ingeniero-geocriológicas es una tarea científica importante (Badina et al., 2024). En este sentido, en el presente estudio se propone probar una metodología para evaluar los daños en la parte lineal de la infraestructura vial (carreteras con pavimento rígido) tomando como ejemplo el proceso de termoerosión.

La termoerosión es un peligroso proceso del permafrost que consiste en la acción simultánea, térmica y mecánica (erosiva), de corrientes de agua sobre suelos congelados (Yershov et al., 1982; Shur & Jorgenson, 2007). Desde el punto de vista morfológico, la termoerosión es el proceso de incisión de un flujo de agua en una masa congelada, con la formación de surcos, zanjas y cárcavas (Lobastova, 1989; Kuchukov & Yershov, 2001). El desarrollo de la termoerosión tiene un impacto perjudicial en las zonas de suelos congelados

permanentes, amenazando instalaciones económicas (Chesnokova et al., 2018), el patrimonio cultural (Nicu et al., 2022) y las carreteras (Connor et al., 2020).

En este proceso existen complejas retroalimentaciones: las carreteras que atraviesan suelos de permafrost modifican las condiciones de congelación, lo que puede intensificar la termoerosión y, en consecuencia, afectar la estabilidad de las estructuras viales (Khimenkov et al., 2023).

En este estudio nos centramos en un ejemplo de una de las regiones árticas de Rusia y centro clave de extracción de recursos hidrocarburíferos: el Distrito Autónomo de Yamalo-Nenets. La región se ubica en el norte de la llanura de Siberia Occidental, en la zona de permafrost, y al norte limita con el mar de Kara. El extremo occidental del distrito, en la margen izquierda del río Obi, atraviesa las laderas orientales de los Urales Polares y Subpolares. Más de la mitad de su territorio se encuentra al norte del Círculo Polar Ártico.

1. MARCO TEÓRICO

En las investigaciones contemporáneas relacionadas con la evaluación de los posibles daños a las carreteras por la acción de diversos peligros naturales y cambios climáticos, se presentan serias dificultades debido a la falta de la información estadística necesaria en acceso abierto. Por ejemplo, en los trabajos de Badina (2021) y Porfiriev & Eliseev (2023) se propone un enfoque para la valoración de la parte inmobiliaria de los activos fijos por tipos de actividad económica, de acuerdo con el clasificador nacional de actividades económicas, pero en un formato muy agregado: para toda la rama de “Transporte y almacenamiento”. Esto impide diferenciar, dentro de ese total, los daños relacionados específicamente con las carreteras. En el estudio de Trofimenko & Yakubovich (2015), los daños a las carreteras por distintos tipos de peligros naturales fueron evaluados de manera experta, sin proporcionar criterios concretos de evaluación ni datos, por lo que los resultados no pueden considerarse altamente objetivos. En relación con lo anterior, las tareas planteadas en este artículo resultan sumamente relevantes.

Nos detendremos con mayor detalle en los aspectos metodológicos de la previsión del daño económico directo de las emergencias de origen natural para los objetos lineales de la infraestructura vial.

Al hablar del peligro natural en cuestión —la termoerosión—, es necesario destacar que existen múltiples factores favorables para su desarrollo, especialmente en las zonas de distribución de suelos de permafrost con presencia de hielos poligonales en vetas. Dado que los procesos erosivos comprenden un conjunto de fenómenos vinculados a la acción de flujos de agua, la característica de resistencia de las rocas puede definirse a través de su facilidad de ser erosionadas. Los más susceptibles a la erosión son las arenas finas, tanto en estado descongelado como congelado; en menor medida se erosionan los suelos arcillosos y las arcillas. Asimismo, las arenas aluviales se erosionan más fácilmente que las marinas.

Los valores del coeficiente de erosión de depósitos con alto contenido de hielo, considerando la hundimiento por descongelación, varían en los suelos arcillosos entre 0,0088 y 0,016 m³/t·m, en los limosos alrededor de 0,0012 m³/t·m, y en las arenas oscilan entre 0,0023 y 0,0043 m³/t·m (Yershov, 2008). Dado que se analiza la acción de corrientes de agua sobre suelos congelados, debe existir escorrentía superficial, lo que implica la presencia de pendientes. En estas condiciones, al estar el sustrato congelado, pendientes pequeñas favorecen el desarrollo de la termoerosión, ya que el flujo de agua alcanza a ejercer un efecto térmico.

Los cambios climáticos, en particular el aumento de la temperatura del aire y la mayor cantidad de precipitaciones, también contribuyen a la intensificación de los procesos termoerosivos en regiones como el Distrito Autónomo de Yamalo-Nenets. Otro factor de riesgo es la elevación del nivel del mar de Kara, que actúa como base de erosión

En la actualidad, prácticamente no existen investigaciones dedicadas a la previsión de riesgo de termoerosión a mesoescala (a nivel regional) para los objetos económicos y de infraestructura, por lo que este estudio busca llenar ese vacío teórico y metodológico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el marco de este estudio, el riesgo natural se entiende como la combinación de la probabilidad y las consecuencias de la ocurrencia de eventos adversos. En atención a la especificidad del peligro natural considerado —caracterizado por una clara localización espacial de las áreas de propagación de la termoerosión, la prolongación temporal de su proceso de desarrollo y la imposibilidad de cuantificar la probabilidad de su activación futura (esto es, de fundamentar estadísticamente la frecuencia de los eventos)—, la determinación fiable del daño medio anual resulta metodológicamente inviable. En este contexto, se opta por la estimación del daño máximo probable que podría generarse en las áreas de distribución de la amenaza analizada. Este enfoque para la valoración del riesgo en términos monetarios presenta una elevada utilidad práctica y ha demostrado ser adecuado en investigaciones contemporáneas (por ejemplo, Gunasekera et al., 2015; Salgado-Gálvez et al., 2017; Paulik et al., 2023; Ogorodov et al., 2026).

2.1. Metodología de evaluación del peligro de termoerosión

La termoerosión está ampliamente distribuida en el Distrito Autónomo de Yamalo-Nenets y ha sido estudiada en detalle en Yamal, especialmente en las zonas de extracción de petróleo y gas, como Bovanénkovo (Sannikov, 2012; Cryosphere of oil and gas., 2013). Para la identificación de zonas de erosión y la previsión de cambios en condiciones climáticas se utilizaron mapas geológicos, fuentes bibliográficas y datos de archivo.

En la primera etapa, con el uso de los paquetes ArcGIS (ArcMap 10.4.1), se realizó la georreferenciación de las pendientes de la superficie, la disección del relieve y la estructura geológica con los datos de permafrost de las rocas (Larin, 2004; Trofimov, 1982). Posteriormente, con base en imágenes satelitales modernas (Google Earth), se efectuó el cartografiado de las áreas de desarrollo de hielos en vetas poligonales. Los sectores fueron divididos según el grado de actividad actual de los procesos termoerosivos. Los datos obtenidos se compararon con mapas geológicos y geomorfológicos, lo que permitió precisar los límites de las zonas con diferente intensidad de desarrollo de la termoerosión. Para la evaluación de los peligros climáticos se consideraron la temperatura del aire al final del período cálido, la cantidad de precipitaciones en invierno y en verano, así como el aumento del nivel del mar (Kislov et al., 2023).

El trabajo con datos de teledetección permite identificar valles fluviales y el carácter de los cauces de los ríos. En los cauces fluviales, por lo general, se produce erosión profunda y lateral. Cuando se eleva el nivel del mar, se intensifica el nivel de base de la erosión, lo que conduce a un incremento de la erosión lateral. El socavamiento de las orillas de los ríos empeora la estabilidad de las laderas debido a la alteración del equilibrio del perfil. Por eso, las zonas con baja intensidad de erosión fluvial pueden colindar con sectores de elevada peligrosidad. Para la evaluación de los riesgos de deformaciones de los cauces se analizó el transporte de sedimentos de los grandes ríos del Distrito Autónomo de Yamalo-Nenets. Los volúmenes varían desde 0,33 millones de toneladas anuales en el río Nadym hasta 15,6 millones de toneladas anuales en el río Obi (Magritsky, 2010). Con una densidad de 1200 kg/m³, esto corresponde a volúmenes de 0,28 a 13 millones de m³ al año. En el Ártico, el origen y la composición de los sedimentos siguen siendo objeto de discusión (Ivanov & Chalov, 2019). Estos ríos son de carácter transitorio, por lo que las verdaderas magnitudes de las deformaciones de los cauces deben precisarse mediante observaciones prolongadas en terreno.

Si un tercio de los volúmenes de sedimentos corresponde a la erosión lateral, entonces según el indicador «volumen relativo de deformaciones simultáneas de suelos» los riesgos climáticos para estos ríos se evalúan como «muy peligrosos».

La delimitación de zonas por grado de peligrosidad se realizó con base en el documento normativo dedicado a la adaptación al cambio climático (Orden del Ministerio de Desarrollo Económico de Rusia del 13.05.2021 N.º 267, URL: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz_minekonomrazvitiya_rossii_ot_13_maya_2021_g_267.html, fecha de consulta 1.08.2025), en función de las áreas afectadas y de la velocidad de desarrollo del

proceso. Si la potencial exposición del territorio supera el 50 %, el nivel de peligrosidad se clasifica como alto (muy peligroso); con un 25–50 % como medio (peligroso), y con menos del 25 % como bajo (moderadamente peligroso). Según la velocidad de desarrollo de la erosión se distinguen niveles de peligrosidad: 1–15 m/año (alto); 1–10 m/año (medio); 1–5 m/año (bajo).

2.2. Metodología de evaluación del costo de las carreteras en áreas de impacto de peligros naturales

La evaluación se basa en el cálculo de los valores límite del costo de reemplazo (costo de reconstrucción) de las carreteras en el desglose de los municipios de las regiones.

En la mayoría de los casos, presentan fuertes contrastes internos, tanto en el nivel de desarrollo socioeconómico y de aprovechamiento económico, como en las condiciones físico-geográficas. En otras palabras, el nivel regional en Rusia resulta demasiado general y no permite rastrear todas las regularidades. El mesonivel (nivel de las entidades municipales) se considera el más óptimo para los estudios de riesgo natural y daños. Es necesario subrayar que no existe información estadística oficial sobre la longitud de las carreteras a nivel municipal ni sobre el costo de su construcción.

Como datos de base para el análisis espacial se utilizaron: la capa vectorial de zonificación territorial por grado de peligro de ocurrencia de procesos termoerosivos (con identificación de zonas de alta, media y baja peligrosidad, así como territorios montañosos), elaborada por los autores; capas vectoriales de carreteras y de la división administrativa-territorial de la región, obtenidas de OSM (Open Street Map). El trabajo se realizó utilizando productos de ESRI ArcGIS.

La preparación preliminar de los datos consistió en la selección de los objetos de la capa vectorial de carreteras que correspondían a caminos de importancia regional, provincial y local. En los cálculos se consideraron únicamente las carreteras principales con pavimento duro, que conforman el armazón de transporte de la región (para las ciudades se tuvieron en cuenta solo las vías troncales). La comparación de la muestra obtenida con los datos disponibles de teledetección permitió excluir carreteras que no cuentan con pavimento duro, como los zimniki (carreteras temporales de uso exclusivamente invernal en condiciones de temperaturas negativas sostenidas), caminos de tierra y carreteras con recubrimiento de grava.

En la siguiente etapa, mediante un overlay espacial multicapas se creó una nueva capa vectorial de carreteras, en la cual para cada objeto lineal se integró:

La información sobre su pertenencia a una entidad municipal;

La característica del grado de peligro de ocurrencia de procesos termoerosivos en los territorios atravesados por dicho objeto lineal.

Se calculó la longitud de las carreteras con pavimento duro dentro de los límites de cada una de las entidades municipales consideradas.

En este estudio se propone la aplicación de un enfoque normativo. Es decir, se tomarán como base documentos oficiales del gobierno, sobre los cuales se realizan los cálculos presupuestarios y la construcción. Como base de los cálculos se considera la Orden vigente del Ministerio de Construcción de Rusia sobre la aprobación de normas consolidadas del costo de construcción para carreteras (por ejemplo, para el año 2025 – Orden del 5 de marzo de 2025 N.º 109/np «Sobre la aprobación de las normas consolidadas del costo de construcción». Normas Consolidadas del Costo de Construcción. NSC 81-02-08-2025. Recopilación N.º 08. Carreteras).

Se introduce la hipótesis de que, de acuerdo con la metodología propuesta, se determinarán los costos mínimos de construcción de reemplazo, ya que no se tendrán en cuenta los matices dependientes de cada proyecto específico (por ejemplo, la posibilidad de utilizar distintos materiales para reforzar el pavimento; el empleo de arena local o transportada; la distancia de acarreo del suelo excedente, la instalación de pantallas antirruído,

etc.). En otras palabras, se tendrán en cuenta únicamente los factores estáticos más significativos (constantes) que determinan los costos: la ubicación geográfica y sus variables derivadas.

Algoritmo de formación de la base de datos

1. Determinación de la altitud predominante del municipio sobre el nivel del mar, m: 1300–2500 m; 2500–3000 m; Más de 3000 m (de acuerdo con la Tabla 4 de la mencionada Orden del Ministerio de Construcción)).
2. Determinación de la pertenencia del municipio a los límites geográficos de las zonas vial-climáticas (de acuerdo con la Tabla 7 de la Orden del Ministerio de Construcción).
3. Coeficiente de transición $K_{trans.}$ para la región / zona de la región (de acuerdo con la Tabla 9 de la Orden del Ministerio de Construcción).
4. Coeficiente $K_{trans./zona}$ para la región (de acuerdo con la Tabla 10 de la Orden del Ministerio de Construcción, si corresponde).
5. Coeficiente $K_{reg.1}$ (de acuerdo con la Tabla 11 de la Orden del Ministerio de Construcción: marcador de la zona de temperatura, véase la Tabla 3 de la Orden del Ministerio de Construcción).
6. Coeficiente $K_{reg.2}$ (de acuerdo con la Tabla 12 de la Orden del Ministerio de Construcción).

El costo de la sustitución total de carreteras en caso de materialización de una amenaza natural potencial (Cost) para cada municipio considerado (j) de la región i se calcula según la fórmula (1):

$$Cost_j = S_i * L_j * K_{trans.i} * K_{trans./zona_i} * K_{reg.1_i} * K_{reg.2_i} \quad (1)$$

donde S_i – norma del precio de construcción del tipo de carreteras considerado en la región i para el distrito base en precios de 2025 (de acuerdo con la Orden del Ministerio de Construcción);

L_j – longitud calculada de las carreteras dentro de los límites del municipio j;

$K_{trans.i}$ – coeficiente de transición de los precios del distrito base al nivel de precios de la región (zona) i;

$K_{trans./zona_i}$ – coeficientes de transición de los precios de la primera zona del sujeto de la Federación Rusa al nivel de precios de las partes del territorio del sujeto de la Federación Rusa, que se establecen mediante actos normativos de los sujetos de la Federación Rusa como zonas de precios independientes;

$K_{trans.1,2_i}$ – coeficientes que tienen en cuenta las condiciones regionales y climáticas de la construcción en el sujeto de la Federación Rusa (o en su parte), en relación con el distrito base.

2.3. Metodología de pronóstico de daños por termoerosión en carreteras

Mediante la superposición en ArcGIS de las capas obtenidas con las carreteras (cuyos valores han sido calculados y añadidos a las tablas atributivas) y los datos sobre el peligro de termoerosión, se identifican las zonas de mayor riesgo. La determinación del costo de reposición de los tramos de carretera en las áreas de mayor peligro permite obtener la magnitud límite de los daños por termoerosión en el caso de materializarse el peor escenario de amenaza. Es necesario señalar que en este trabajo no se consideraron las soluciones técnicas e ingenieriles ya existentes destinadas a reducir el riesgo de termoerosión, debido a la ausencia de dicha información.

3. RESULTADOS

Los resultados de la evaluación del peligro de termoerosión para el territorio del distrito autónomo de Yamalo-Nenets se presentan en la Figura 1.

Evaluación de las pérdidas económicas derivadas de los procesos de erosión térmica (el caso de la infraestructura vial)

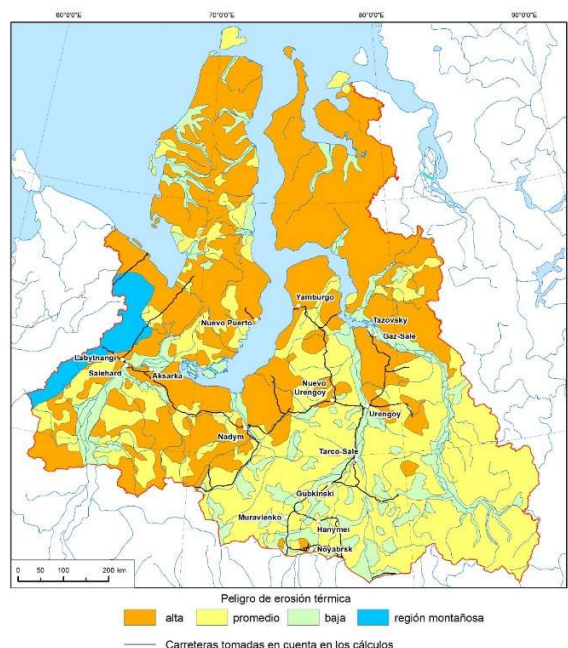


Figura 1: Peligros del desarrollo de los procesos de erosión. Fuente: elaborado por los autores

La zonificación del territorio según el grado de peligro de desarrollo de procesos erosivos se realizó considerando la combinación de factores que contribuyen a su activación. Las áreas más estables, donde se registra un nivel mínimo de peligro, corresponden a los complejos de llanuras aluviales de los ríos, debido a la falta de información detallada, como se señaló anteriormente. El mayor peligro se observa en las zonas de distribución continua de suelos de permafrost, los cuales presentan una alta erodabilidad. La probabilidad de intensificación de estos procesos en dichas zonas aumenta en el contexto del cambio climático actual. La zona de los montes Urales fue excluida del análisis debido al predominio de suelos rocosos y al desarrollo de procesos geomorfológicos que no se relacionan con el objeto de este estudio.

La mayor actividad de los procesos erosivos se registra en las áreas de distribución continua de arenas permafrost, donde predominan los depósitos arenosos y se observa un relieve fuertemente disectado. Tales condiciones son características de las penínsulas de Yamal, Gydan y Tazovski. Allí, la combinación de alta erodabilidad de los suelos y un microrelieve complejo favorece el desarrollo activo de procesos termoerosivos, que avanzan con una velocidad relativamente alta. En el territorio del Pre-Urales, la erosión es favorecida por la combinación del relieve montañoso disectado y la amplia distribución de arenas aluviales. Estos factores también generan condiciones propicias para la transformación erosiva de los paisajes, especialmente en zonas con vegetación alterada. En la parte sureste del distrito autónomo de Yamalo-Nenets, la intensidad de los procesos erosivos y termoerosivos es significativamente menor. Esto se relaciona con el relieve predominantemente plano y con condiciones menos favorables para su activación.

Los resultados de los cálculos sobre el costo de reposición de las carreteras con pavimento rígido y los daños probables máximos para las carreteras en zonas con distintos niveles de peligrosidad por termoerosión, desglosados por entidades municipales, se presentan en el mapa (Figura 2).

En general, el distrito autónomo de Yamalo-Nenets posee una red de carreteras relativamente poco desarrollada en comparación con otras regiones de Rusia. La densidad de carreteras públicas pavimentadas en este territorio, según datos de Rosstat (Servicio Federal de Estadística del Estado de Rusia), es de 3,7 km por cada 1.000 km², frente a un promedio nacional de 66 km. No obstante, en las últimas décadas se ha llevado a cabo una construcción vial a gran escala, como la carretera sublatitudinal Nadym–Salekhard, que conectó la parte occidental del distrito —vinculada por ferrocarril con la zona europea de Rusia— con su centro y oriente,

menos desarrollados en términos de infraestructura. La construcción fue finalizada en 2020.

La calidad de las carreteras del distrito es relativamente alta: la proporción de carreteras públicas de uso regional o intermunicipal que cumplen con los requisitos normativos al final del año supera el promedio nacional y alcanza el 56%. Asimismo, la proporción de carreteras pavimentadas respecto de la longitud total de la red vial pública es del 93,2%, de las cuales el 86,3% cuenta con un pavimento mejorado (los indicadores nacionales son 71,2% y 62%, respectivamente).

Los cálculos realizados según la fórmula (1) mostraron que el costo total de la sustitución completa de las carreteras en el distrito autónomo de Yamalo-Nenets asciende a aproximadamente 5 mil millones de dólares estadounidenses a precios del año 2025 (Figura 2). El costo máximo de reposición de las carreteras corresponde al municipio de Purovsky (1.726,7 millones de USD) y al municipio de Nadym (1.480,6 millones de USD), donde se ubican los principales centros de extracción de hidrocarburos de la región, así como al municipio de Priuralsky, adyacente a la capital regional (672,7 millones de USD).

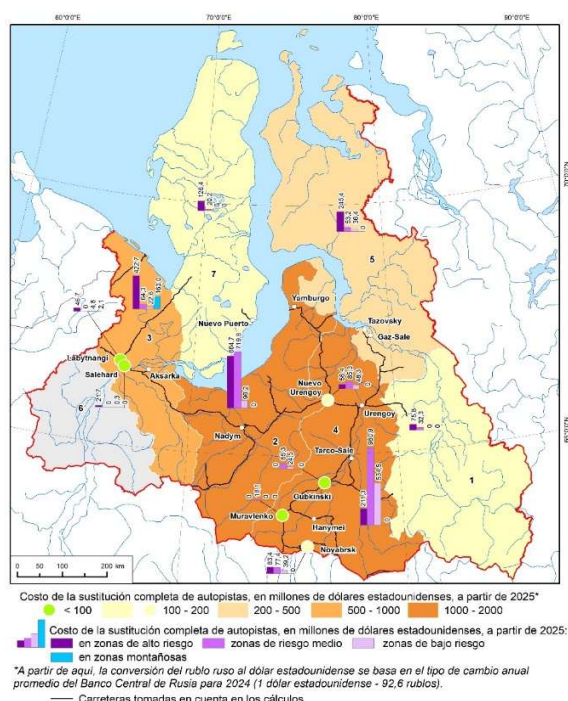


Figura 2: Estimación del coste de la sustitución completa de autopistas. 1 - Distrito Municipal de Krasnoselkupsk; 2 - Distrito Municipal de Nadym; 3 - Distrito Municipal de Praural; 4 - Distrito Municipal de Purov; 5 - Distrito Municipal de Tazovsky; 6 - Distrito Municipal de Shuryshkar; 7 - Distrito Municipal de Yamal. Fuente: elaborado por los autores

La comparación de los resultados obtenidos sobre el costo de reposición de las carreteras con las áreas caracterizadas por distintos niveles de peligrosidad por termoerosión mostró que el 39 % de las carreteras pavimentadas del distrito autónomo de Yamalo-Nenets se encuentran en zonas de alta peligrosidad. El costo total de reposición en caso de una pérdida del 100 % ascendió a 1.964 millones de USD, el 42 % (2.117 millones de USD) en zonas de peligrosidad media, el 16 % (807 millones de USD) en zonas de peligrosidad baja y el 3 % (165 millones de USD) en áreas montañosas. Estas cifras en su conjunto evidencian un alto nivel de riesgo de termoerosión para la infraestructura vial del distrito autónomo de Yamalo-Nenets y la necesidad de una mayor atención a este problema por parte de las autoridades regionales.

La mayor proporción de carreteras situadas en áreas con alto nivel de peligrosidad termoerosiva se encuentra en los principales centros de extracción de hidrocarburos: municipio de Nadym (665 millones de USD), municipio de Tazovsky (254 millones de USD), municipio de Purovsky (211 millones de USD), así como en el municipio de Priuralsky (423 millones de USD).

La importancia de la infraestructura vial y de su funcionamiento coordinado e ininterrumpido para los centros de extracción de petróleo y gas —incluyendo el abastecimiento, la movilidad de los trabajadores de las empresas extractivas, muchos de los cuales laboran en régimen de turnos rotativos— es extremadamente alta. Las condiciones naturales y climáticas adversas del Ártico y la falta de alternativas de transporte entre determinados territorios constituyen factores adicionales que refuerzan la relevancia de un funcionamiento seguro y sin interrupciones de las carreteras en el distrito autónomo de Yamalo-Nenets.

Por lo tanto, para los municipios identificados en este estudio como de alto nivel de riesgo, resulta prioritaria la elaboración de medidas preventivas, así como la formación de un conjunto de acciones eficaces destinadas a reducir el nivel de riesgo y los posibles daños.

4. DISCUSIÓN

La necesidad de evaluaciones científicas de las consecuencias socioeconómicas de los cambios climáticos observados y previstos, de la vulnerabilidad de los territorios a los efectos adversos del cambio climático, así como de la construcción de estrategias y mecanismos de adaptación científicamente fundamentados, constituye una prioridad clave del desarrollo sostenible global (The Sustainable., 2020). De acuerdo con las recomendaciones de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, desde 2011 varios países, incluida Rusia, han elaborado planes nacionales de adaptación. En 2023, siguiendo las directrices metodológicas del Ministerio de Desarrollo Económico de Rusia, las regiones comenzaron a elaborar sus propios “Planes de Adaptación”; sin embargo, la calidad de estos en varios casos resulta insuficiente, lo cual se refleja principalmente en la omisión (o ignorancia) de problemas esenciales relacionados con la especificidad regional (y en particular intrarregional), lo que pone en duda su eficacia.

Los elementos de infraestructura crítica, incluidas las carreteras, se encuentran entre los objetos prioritarios que requieren medidas de protección y adaptación, dado que de su funcionamiento ininterrumpido depende en gran medida la estabilidad de la sociedad y de la economía en todos los niveles del ordenamiento administrativo-territorial.

En las regiones árticas, donde los cambios climáticos ocurren a un ritmo acelerado (IPCC, 2022), el problema de la activación de procesos naturales peligrosos relacionados con la degradación del permafrost adquiere especial relevancia. Las carreteras pueden sufrir daños como resultado de procesos erosivos y termoerosivos de diversa naturaleza e intensidad. El impacto menos significativo es el desgaste de los taludes, que reduce su estabilidad y exige la realización de trabajos adicionales de relleno y refuerzo. Bajo una influencia más intensa, puede producirse la destrucción del pavimento, con formación de deformaciones y daños en la capa estructural de la carretera, lo que, en última instancia, puede requerir la reconstrucción completa de la infraestructura vial.

Además, en las zonas de permafrost, las destrucciones pueden deberse no solo a procesos individuales, sino también al impacto combinado de varios factores exógenos. Entre ellos destacan: el termokarst, proceso de subsidencia y deformación relacionado con el deshielo de los suelos permafrost; la sufusión, es decir, el arrastre de partículas del suelo con la formación de cavidades y asentamientos posteriores; y la expansión por heladas, un proceso de hinchamiento estacional del suelo provocado por la congelación del agua, que ocasiona deformaciones en la estructura de la carretera.

Estos procesos están interrelacionados y pueden reducir significativamente la durabilidad y la seguridad operacional de las carreteras en condiciones de permafrost.

En este contexto, el enfoque propuesto en este artículo para la evaluación de los daños a la infraestructura vial por procesos naturales peligrosos, incluidos los derivados del cambio climático, puede ser un mecanismo útil que permite identificar las zonas de mayor riesgo, estimar el rango de posibles daños y, al compararlo con el nivel de los costos necesarios para las medidas preventivas, estructurar y priorizar un conjunto de acciones de protección específicas para cada territorio.

5. CONCLUSIONES

Con base en los resultados de la investigación científica presentada en este artículo, pueden formularse las siguientes conclusiones:

1. En Rusia, la falta de información estadística accesible sobre el costo de distintos tipos de activos fijos requiere el desarrollo de metodologías específicas para su valoración con fines de pronóstico de daños derivados de peligros naturales.
2. En este estudio se propuso una metodología para la evaluación del costo de reposición de los objetos lineales de la infraestructura vial en el desglose de los municipios de las regiones de Rusia. Una limitación del método radica en su aplicabilidad restringida al territorio de la Federación de Rusia, dado que el cálculo de los daños máximos probables se fundamenta en datos provenientes de normativas jurídico-administrativas de carácter local.
3. La termoerosión constituye una amenaza significativa para las regiones de permafrost en Rusia. Su impacto sobre las carreteras puede provocar deformaciones y destrucciones, ocasionar graves daños y generar efectos multiplicadores negativos para la sociedad y la economía regional. Una protección eficaz contra los procesos erosivos y termoerosivos requiere un conjunto de medidas ingeniero-técnicas y de protección ambiental, entre las que se incluyen: la instalación de sistemas de drenaje, la termostabilización de los suelos, el refuerzo de taludes, la restauración de la cubierta vegetal, así como el monitoreo del estado térmico y de la dinámica de la superficie para prevenir oportunamente consecuencias destructivas.
4. La aplicación de la metodología de evaluación del riesgo termoerosivo en carreteras en el caso del distrito autónomo de Yamalo-Nenets (uno de los mayores territorios árticos de Rusia y centro de extracción de hidrocarburos) mostró que la magnitud máxima de los daños probables para las carreteras en zonas de alta peligrosidad termoerosiva asciende a aproximadamente 1.964 millones de dólares estadounidenses, lo que corresponde al 39 % de todas las carreteras pavimentadas de la región. Esta cifra corresponde a una estimación teórica obtenida sobre la base del supuesto de un escenario extremo de pérdida total (100 %) de la infraestructura vulnerable.

AGRADECIMIENTOS

La investigación se llevó a cabo en el marco del tema presupuestario estatal de investigación científica del Laboratorio de Investigación en Geoecología del Norte de la Facultad de Geografía de la Universidad Estatal de Moscú M. V. Lomonósov "Challenges of developing the Arctic zone of the Russian Federation: hazardous exogenous processes and environmental management risks" 126042920506-7.

REFERENCIAS

Anisimov, O.A., Badina, S.V. (2024). Optimization of regional adaptation plans to climate change in the Russian Arctic based on forecasting modeling. *Arctic: Ecology and Economy*, 14 (3), 350-359. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-350-359. (En ruso).

Badina, S.V. (2021). Estimation of the value of buildings and structures in the context of permafrost degradation: The case of the Russian Arctic. *Polar Science*, 29, 100730. DOI: 10.1016/j.polar.2021.100730

Badina, S., Pankratov, A. (2022). Assessment of the impacts of climate change on the Russian Arctic economy (including the energy industry). *Energies*, 15(8), 2849.

Badina, S.V., Turchaninova, A.S., Baburin V.L., & Minchenkova A.M. (2024). Assessment of economic damage from natural hazards to the railway infrastructure of the Russian Federation. *Regional Research of Russia*, 14 (3), 503–511.

Botzen, W.W., Deschenes, O., & Sanders, M. (2019). The economic impacts of natural disasters: A review of models and empirical studies. *Review of Environmental Economics and Policy*, 13(2), 167-188.

Chesnokova, I., Likhacheva, E., & Morozova, A. (2018). Stable Development of the Natural Environment in the Arctic Region of the Russian Federation. *Arctic Yearbook*, 361.

Connor, B., Goering, D. J., Kanevskiy, M., Trochim, E., Bjella, K. L., & McHattie, R. L. (2020). Roads and airfields constructed on permafrost: A synthesis of practice (INEAUTc 2020.11/AKDOT&PF Report No. 000S927). University of Alaska Fairbanks, Institute of Northern Engineering & Alaska Department of Transportation and Public Facilities

Coronese, M., Lamperti, F., Keller, K., Chiaromonte, F., & Roventini, A. (2019). Evidence for sharp increase in the economic damages of extreme natural disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(43), 21450-21455.

Critical infrastructure: Reliability and vulnerability / A.T. Murray, T. Grubestic T. (Eds.). Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2007. 311 p.

Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula. Cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field (2013). Badu, Yu. B., Gafarova, N. A., & Podborny, E. E. (Eds.). (2013). Moscow Gazprom Expo LLC, 423 p.

Done, A. (2012). Natural disasters. In *Global Trends: Facing Up to a Changing World*. London: Palgrave Macmillan UK, 227-246.

Gunasekera R., Ishizawa O., Aubrecht C., Blankespoor B., et al. (2015). Developing an adaptive global exposure model to support the generation of country disaster risk profiles, *Earth-Science Reviews*, 150, 594-608, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.08.012>.

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 p.

Ivanov, V., Chalov, S. (2019). Assessment of sediment load and composition of the Ob River. In Proceedings of the 5th All-Russian Scientific Conference with International Participation: Patterns of manifestation of erosion and channel processes in various natural conditions (Moscow State University, Moscow, Russia, September 3–6, 2019) (pp. 217–220). (En ruso).

Khimenkov, A.N., Sergeev, D.O., Kulakov, A.P., & Romanov, A.V. (2023). Specifics of engineering and geocryological monitoring of highways operated in permafrost regions. *Arktika i Antarktika*, (4), 125–157. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.4.68814> (En ruso).

Kislov, A., Alyautdinov, A., Baranskaya, A., Belova, N., Bogatova, D., Vikulina, M., Zheleznova, I., & Surkova, G. (2023). A Spatially Detailed Projection of Environmental Conditions in the Arctic Initiated by Climate Change. *Atmosphere*, 14(6), 1003. <https://doi.org/10.3390/atmos14061003>

Kuchukov, E.Z., & Yershov, E.D. (2001). Termoeroziya. In E.D. Yershov (Ed.), *Fundamentals of Geocryology. Part 4: Dynamic Geocryology* (Chap. 10, pp. 578–600). Moscow: Moscow State University. (En ruso).

Larin, S.I. (Ed.). (2004). *Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous Area*. Omsk, Russia: Federal State Unitary Enterprise Omsk Cartographical Factory. (En ruso).

Lobastova, S.A. (1989). Dynamics of the maximum intensity of erosion of frozen soils. *Physicochemical hydrodynamics*, 63-70. (En ruso).

Magritsky, D.V. (2010). Annual suspended sediment runoff of Russian rivers of the Arctic Ocean basin and its anthropogenic changes. *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*, (6), 17–24.

Melnikov, V.P., Osipov, V.I., Brouchkov, A.V. et al. (2022). Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*, 112, 231–251, <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05179-6>

Nicu, I.C., Tanyas, H., Rubensdotter, L., & Lombardo, L. (2022). A glimpse into the northernmost thermo-erosion gullies in Svalbard archipelago and their implications for Arctic cultural heritage. *Catena*, 212, Article 106105, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106105>

Ogorodov S.A., Badina S.V., Novikova A.V. et al. (2026). Vulnerability of coastal infrastructure to extreme floodings: case study of Varandey area, Barents sea, Russian Arctic. *Natural Hazards*, 122, 298. DOI: 10.1007/s11069-026-08067-z

Petrova, E. (2020). Natural hazard impacts on transport infrastructure in Russia, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 1969–1983, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1969-2020>

Porfiriev, B. (2012). Economic issues of disaster and disaster risk reduction policies: International vs. Russian perspectives. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 1, 55-61.

Porfiriev, B.N., Eliseev, D.O. (2023). Integral approach to the economic assessment of the consequences of permafrost degradation for the sustainability of fixed assets in the Russian Arctic. *Studies on Russian Economic Development*, 197 (2) 30–43. (En ruso). <https://doi.org/10.47711/0868-6351-197-30-43>

Porfiriev, B.N., Kolpakov, A.Y., Eliseev, D.O., Saenko, V.V., Polzikov, D.A., Lazeeva, E.A., & Biryukov, E.S. (2025). Economic Effects of Climate Change in Russia. *Studies on Russian Economic Development*, 36(2), 161-174.

Paulik R., Zorn C., Wotherspoon L., Sturman J, (2023). Modelling national residential building exposure to flooding hazards, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 94, 103826,

<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103826>.

Salgado-Gálvez, M.A., Bernal, G.A., Zuloaga, D. et al. (2017). Probabilistic Seismic Risk Assessment in Manizales, Colombia: Quantifying Losses for Insurance Purposes. *Int J Disaster Risk Sci* 8, 296–307. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0137-6>

Sannikov, G.S. Cartometric research of thermokarst lakes within the Bovanenkovo gas field territory, Yamal peninsula. *Earths Cryosphere* 2012, 16, 30–37. (En ruso).

Shur, Y., & Jorgenson, M.T. 2007. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18, 7–19.

The Sustainable Development Goals Report 2020. New York, United Nations, 2020, 68 p.

Trofimenko, Y.V., Evgenev, G.I., Shashina, E.V. (2017). Functional loss risks of highways in permafrost areas due to climate change. *Procedia engineering*, 189, 258-264. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.041>

Trofimenko, Y.V., Yakubovich A.N. (2015). Methods for predicting the risks of natural emergencies on the road network. *Safety in the technosphere*, 2, 73-82. (En ruso).

Trofimov, V.T. (Ed.) Map of genetic types and ice content of the upper 10-meter part of permafrost rocks of the West Siberian Plain. geocryological zoning of the according to the upper horizon of the permafrost. Scale 1:1,000,000 Million; Moscow State University: Moscow, Russia, 1982. (En ruso).

Yershov, E.D. (Ed.). 2008. Fundamentals of geocryology. Part 6. Geocryological forecast and environmental issues in the cryolithozone (765 p.). Moscow: Moscow State University. (En ruso)

Yershov, E.D., Malinovsky, D.V., & Kuchukov, E.Z. (1982). *Termoeroziya dispersnykh porod* (E.D. Yershov, Ed.). Moscow: Moscow State University Publishing, 193 p. (En ruso)