

Evaluación de las condiciones de crecimiento de la vegetación en caminos forestales boreales: aplicación del lidar aéreo

Narimene Braham^{1,2,3}
Oswaldo Valeria^{1,2,3,4}

¹ Institut de recherche sur les forêts, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

² Chaire de recherche d'aménagement forestier durable UQAT – UQAM, Québec, Canada.

³ Centre d'étude de la forêt, Université du Québec à Montréal.

⁴ Hémera Centro de Observación de la Tierra, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Santiago de Chile

La adquisición de información precisa sobre la vegetación a partir de plataformas de escaneo láser aerotransportadas (comúnmente conocidas como plataformas LiDAR), como es el caso de muchas plataformas de adquisición remota de datos como satélites y drones, tiene un gran potencial para reemplazar los inventarios de campo, que pueden ser lentos, costosos y laboriosos. En particular, las herramientas de teledetección son pertinentes para la adquisición de información de la vegetación (particularmente caracterizar su rebrote) próxima a los caminos forestales, sin embargo, los estudios son actualmente limitados. Una mejor comprensión ecológica de los factores que influyen en el rebrote de la vegetación en el área generada por los caminos forestales permitiría adaptar las prácticas de gestión para ayudar a reducir la huella generada por el hombre asociada a la expansión de los caminos forestales en los paisajes boreales.

Los caminos forestales son esenciales para el abastecimiento de recursos naturales y el transporte de materias primas desde los bosques boreales. Estas estructuras pueden tener características morfológicas y funciones distintas, pero su geometría y configuración espacial similares dan lugar a efectos ambientales análogos. En particular, la construcción de caminos forestales es similar en

cuanto a la generación de efectos de perturbación, ya que requiere el uso de maquinaria pesada que conlleva a la compactación de la capa superficial del suelo por las operaciones de construcción y mantenimiento impidiendo junto al tráfico constante que la vegetación se recupere. Esta situación genera un impacto casi permanente sobre el paisaje.

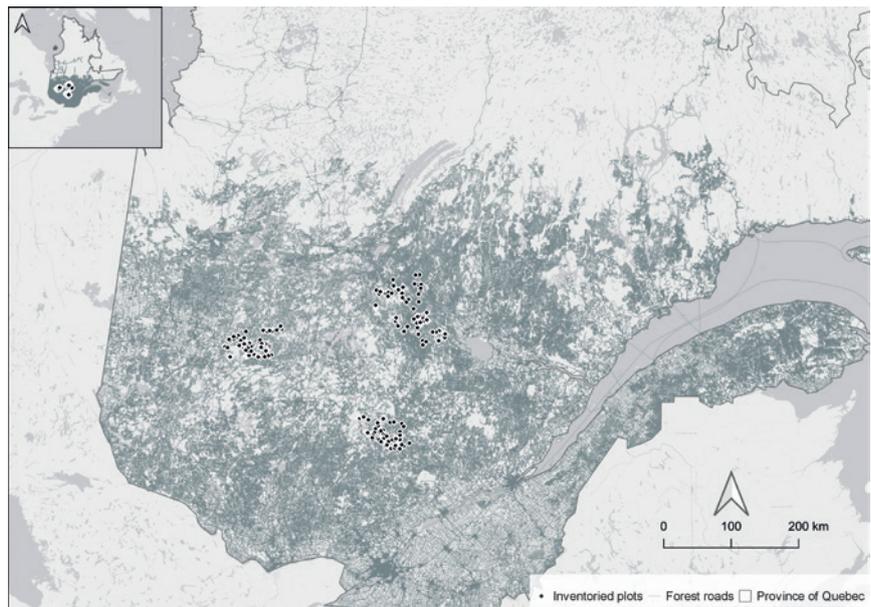
Desde que se estableció una estrecha relación entre la degradación

del hábitat de las especies silvestres dependientes de los bosques, especialmente el hábitat del caribú, y la expansión generalizada de los caminos forestales, se ha despertado un gran interés por los proyectos interesados en reducir o comprender este impacto. En el estado actual de las tendencias climáticas mundiales, los caminos forestales son parte integrante de los paisajes manejados: en Quebec se construyen cada año entre 4000 y 5000 km de caminos forestales. La acumulación de estos caminos en la provincia representa más de 12 veces la vuelta al mundo. En otras palabras, estas infraestructuras se han extendido por el bosque boreal en el espacio y en el tiempo. Sin embargo, los caminos tardan al menos dos décadas en empezar a mostrar signos de revegetación dependiendo del nivel de mantenimiento. Si a esto se añade el tráfico continuado por parte de los vehículos, se necesitaría un ciclo de varias décadas (teórico) para que los niveles de vegetación volvieran a condiciones comparables a las de los bosques adyacentes. Todos estos factores de uso, compactación generada por los vehículos y crecimiento limitado en una densa red de caminos, conducen a una intensificación de la fragmentación y del efecto de borde y a una reducción de la continuidad del dosel.

EFFECTO DE BORDE Y VENTAJAS RELACIONADAS CON EL CRECIMIENTO DE LA VEGETACIÓN EN LOS CAMINOS FORESTALES

Incluso si algunos de los caminos forestales son considerados temporales o de "bajo impacto", estos contribuyen a la fragmentación, al estar la mayoría (70 %) de los bosques del mundo a menos de un kilómetro de un borde, conduciendo a una disminución de la idoneidad del hábitat en la proximidad de los caminos causado por los efectos de borde.

El efecto de borde, o a veces efecto de barrera, se refiere a los límites creados entre un entorno natural y otro antrópico, como la eliminación del dosel creado por las estructuras lineales como, por ejemplo: caminos,



Área de estudio. En el mapa, los límites de la región son en gris pálido y las unidades experimentales están indicadas con cuadrados negros además de las carreteras también en gris



Vegetación en caminos forestales tras años sin gestión

trazados de líneas hidroeléctricas, etc. Los efectos de borde provocan una discontinuidad en la matriz forestal y dan lugar a la fragmentación del hábitat. Los beneficios del crecimiento de la vegetación en estas estructuras incluyen:

- Reducción del efecto de borde y, por tanto, el impacto de la huella lineal antrópica
- Favorecimiento de la continuidad de la matriz forestal
- Beneficio de las especies dependientes del bosque
- Reducción de los impactos a largo plazo sobre la biodiversidad

APLICACIÓN DE MÉTODOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO EN ECOLOGÍA FORESTAL

Teniendo en cuenta estos impactos, hay una serie de cuestiones que deben abordarse. ¿Cuáles son los niveles de vegetación actuales y futuros en los caminos forestales? ¿Es posible estimar con precisión

las condiciones de crecimiento de la vegetación en las proximidades de los caminos forestales? ¿Qué factores influyen en los niveles de vegetación que pueden observarse en los caminos forestales?

Para responder a estas preguntas, el uso de la teledetección y los métodos de modelización nos proporcionan alternativas interesantes para adquirir informaciones sobre el crecimiento y estructura de la vegetación y así poder estimar las condiciones en las cuales el crecimiento evoluciona en el tiempo según la categoría de camino forestal. Las categorías de caminos varían en función de la utilización o función, así algunos caminos permiten altas velocidades y grandes volúmenes de carga mientras que otros son limitados en velocidad (radios de curvas reducidos) y bajos niveles de tránsito según la temporada del año (invierno o verano).

Los métodos de aprendizaje

automático se utilizan en diversas aplicaciones de la teledetección aplicada a la silvicultura, a saber, los ciclos del carbono y la evaluación de riesgos mediante enfoques de modelización y clasificación. Con la diversificación y multiplicación de las bases de datos, estos métodos son cada vez más valiosos y pertinentes por varias razones, principalmente el libre acceso a datos detallados y de alta resolución sobre grandes áreas geográficas.

Utilizamos un modelo numérico de altura del dosel 2x2 m obtenido via la clasificación de datos LIDAR disponible en las bases de datos libre acceso del gobierno de Quebec. Esta información combinada a la posición del camino nos permitió obtener la cobertura de la vegetación a partir del centro del camino hacia ambos bordes (bosque adyacente) a intervalos de un metro. Los caminos seleccionados responden a diferentes periodos de tiempo permitiendo



Camino angosto mostrando signos avanzados de cubierta vegetal, 30 años sin mantenimiento



Camino forestal que muestra signos intermedios de cubierta vegetal, 15 años sin mantenimiento

generar un análisis temporal de la variación de la cobertura de la vegetación y según la categoría de camino (aquí interpretado como el ancho de la huella del camino).

Para la evaluación y predicción de la vegetación de los caminos forestales se comparó la precisión de varios enfoques de aprendizaje automático utilizados habitualmente en la bibliografía con el fin de determinar un enfoque óptimo.

ENFOQUES DE MODELIZACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LOS FACTORES SUBYACENTES DEL CRECIMIENTO DE LA VEGETACIÓN EN EL CAMINO

Con el fin de proporcionar un modelo predictivo adecuado para estimar la cubierta vegetal en los caminos forestales, comparamos el rendimiento de los siguientes enfoques de regresión por mínimos cuadrados: i) mlr, ii) gam, y cuatro enfoques de regresión de aprendizaje automático: iii) mars, iv) knn, vi) rf, y vi) gbm. Realizamos una validación cruzada agrupada de 10 veces, siendo las categorías de caminos forestales (en este caso 3) el factor

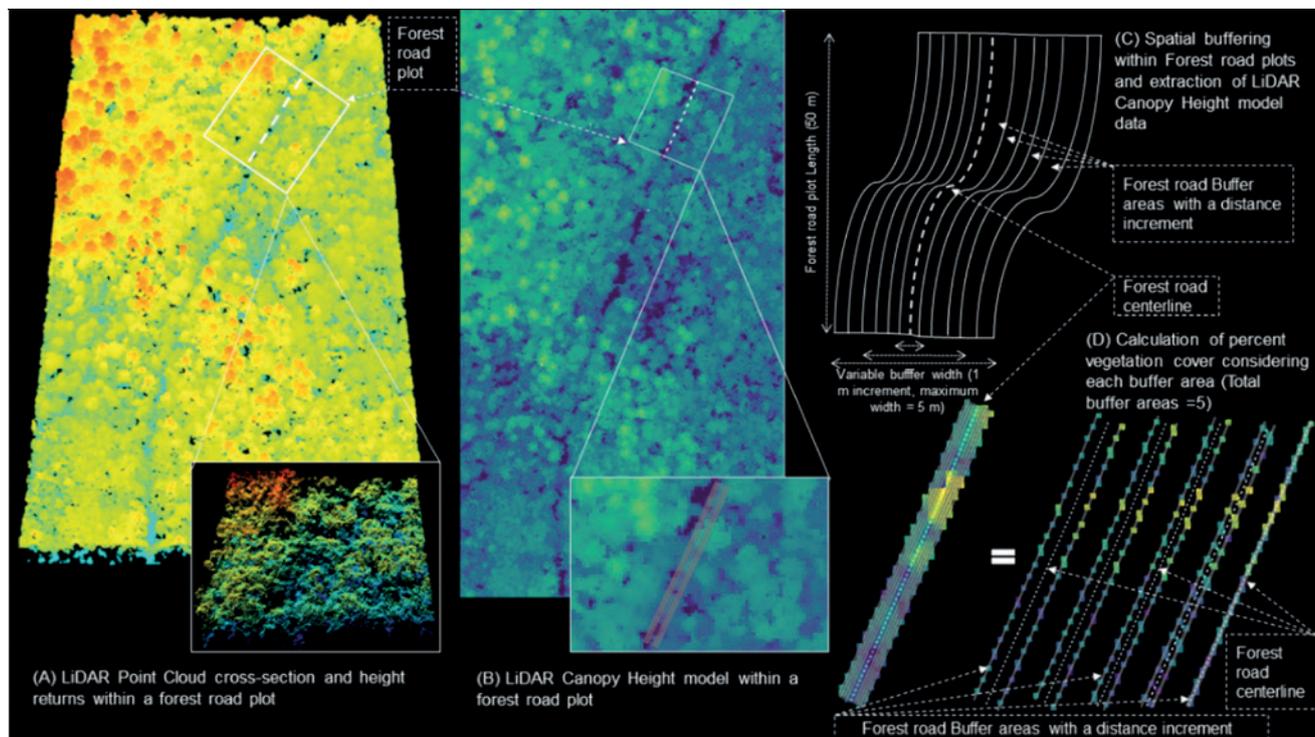
de agrupación que permitió la distribución equitativa de nuestras muestras agrupadas entre i) muestras de entrenamiento, prueba y validación, la partición agrupada se realizó antes del modelado y nuestras muestras se distribuyeron de manera aleatoria con respecto a los grupos establecidos. Realizamos una combinación de entrenamiento-validación del 60-40 % para evaluar el rendimiento de nuestros modelos. Además, para evitar resultados sesgados, cada modelo se ejecutó 20 veces (20 repeticiones). El rendimiento de la validación cruzada agrupada y de la validación independiente (utilizando el 40 % de datos retenidos) se evaluó utilizando RMSE y el coeficiente de determinación (R^2) para evaluar la precisión global. Todo el procesamiento de datos, la modelización y la validación se realizaron en el entorno de software R versión 4.1. Mas información sobre el método disponible en (Braham, Valeria & Imbeau 2023).

La mayor precisión se obtuvo con el enfoque rf (RMSE entre 18,69 % y 20,29 % y R^2 entre 0,69 y 0,62 utilizando los conjuntos de datos de

prueba y validación, respectivamente). El cálculo de la importancia de los factores se realizó mediante la función varImpPlot de la biblioteca RandomForest.

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CRECIMIENTO DE LA VEGETACIÓN DE LOS CAMINOS FORESTALES

A partir de los resultados de un método de modelización para el análisis del crecimiento de la vegetación de los caminos forestales en bosques boreales, nos propusimos determinar qué factores favorecen la cubierta vegetal. Nuestros análisis muestran que el ancho del camino y el tiempo transcurrido desde el último mantenimiento o construcción desempeñan un papel fundamental. La cubierta vegetal crece más rápido en los caminos más estrechos debido a los estándares más bajo de construcción y concepción (calidad y cantidad de material granular, trazado, forma y profundidad de alcantarillas, capacidad de carga, etc.). Estas diferencias de estándares se reflejan además en su trafabilidad, frecuencia e intensidad de uso. Por ejemplo,



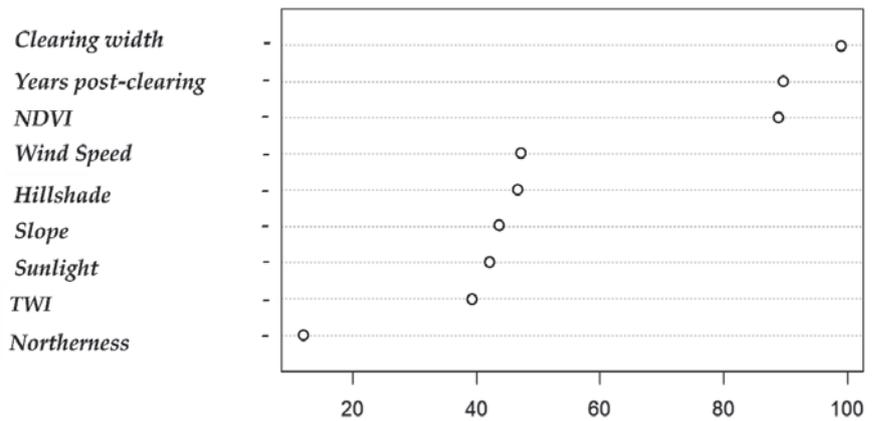
Descripción gráfica de las etapas metodológicas de extracción de la información raster: 1) modelo numérico de la altura del dosel (A y B) 1, 2) identificación de la línea central del camino e implantación de buffer de un metro en ambos lados del centro del camino (C), 3) extracción de la proporción de la cobertura vegetal > 1.3 m por cada uno de los buffer (D).

los materiales gruesos con mayores niveles de contenido granular (grava gruesa y/o roca triturada) se utilizan con frecuencia como capa superior en las carreteras anchas para garantizar una mayor capacidad de carga. Debido a su uso intensivo, también es probable que las vías anchas experimenten una mayor intensidad de uso por parte de maquinaria pesada, camiones y vehículos todoterreno, lo que se traduce en una alteración mayor de la capa superior de la vía durante periodos más largos. Una consecuencia de todas estas condiciones es el aumento de los niveles de compactación que dan lugar a la alteración de las propiedades hidro físicas en la capa superficial de los caminos, limitando así el crecimiento de la vegetación.

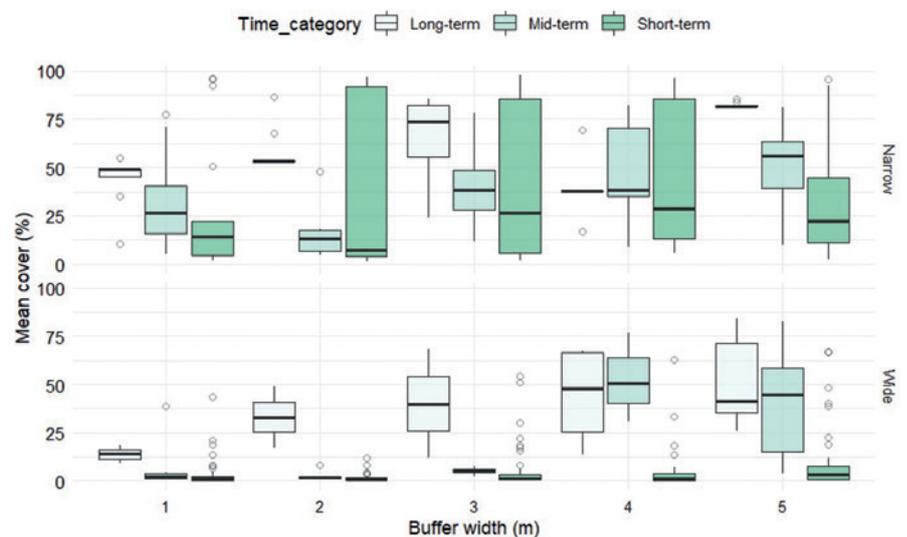
Dada nuestra clasificación de los factores que promueven la cubierta vegetal, los resultados son coherentes con la hipótesis de que el ancho del camino es un modulador de las condiciones abióticas y edáficas que conduce a variaciones significativas en los niveles de cubierta vegetal entre caminos estrechos y anchos. En consecuencia, es necesario investigar el entorno abiótico dentro de los caminos para comprender mejor las posibles explicaciones de los patrones abiótico-bióticos asociados.

GESTIÓN FORESTAL PARA REDUCIR LA HUELLA LINEAL GENERADA POR LOS CAMINOS FORESTALES

En resumen, parece esencial tener en cuenta las dimensiones de los caminos y el tiempo transcurrido desde el último mantenimiento importante o construcción como principales factores de control a la hora de evaluar los niveles de cubierta vegetal en los caminos forestales. Esto podría proporcionar un medio de optimizar las dimensiones de los caminos para un mejor control de las discontinuidades en la matriz forestal. Además, demostramos aquí que los métodos de aprendizaje automático ofrecen grandes ventajas para reducir el sesgo de la estimación en nuestros modelos de las características de la vegetación en el camino.



Importancia relativa de la contribución de variables en el modelo que describe el crecimiento de la vegetación en los caminos forestales; Ancho del camino (clearing width), años transcurridos desde el último mantenimiento (years post clearing), índice de vegetación NDVI, velocidad del viento (wind speed), efecto sombra (hillshade), pendiente (slope), luminosidad solar (Sunlight), índice de humedad topográfica (TWI), posición relativa del norte magnético (Northerness).



DESARROLLO CONTINUO: LOS MÉTODOS DE MODELIZACIÓN AUTOMÁTICA SEGUIRÁN AVANZANDO CON PASO FIRME

Nuestras estimaciones sugieren que harán falta al menos 20 años para que los caminos más anchos o estrechos alcancen una cubierta vegetal de alrededor del 50 % y el 80 % respectivamente.

Los resultados obtenidos hasta ahora sugieren que los métodos de aprendizaje automatizado representan una vía interesante para la estimación de las condiciones de la vegetación debido a su capacidad para aprender algunas de las condiciones subyacentes y las complejas relaciones entre la respuesta de la vegetación y los factores potenciales.

Además, aunque el proyecto se centra en los caminos forestales de tres zonas de estudio pertenecientes al bosque boreal manejado, estos métodos podrían evaluarse a otras escalas de estudio (por ejemplo, regional o provincial) y mejorarse probando el efecto de factores relacionados, por ejemplo, con las propiedades del sustrato utilizado o los niveles de uso de vehículos.

Para más información:

Braham, N. Valeria, O and L. Imbeau 2023. Characterization of Vegetation Dynamics on Linear Features Using Airborne Laser Scanning and Ensemble Learning. 2023. Forests 14(3):511.DOI : 10.3390/f14030511