

Transformación de las predicciones a escala regional en detecciones a escala de objetivos, con la ayuda de métodos avanzados de estadística y aprendizaje automático



Transformación de predicciones a escala regional en detecciones a escala de objetivos mediante métodos avanzados de estadística y aprendizaje automático

Para este último artículo, hemos invitado a Bijal Chudasama, investigadora científica postdoctoral, y a Johanna Torppa, científica principal de la Unidad de Soluciones de Información del Centro de Investigación Geológica de Finlandia (GTK), para que nos orienten en la investigación que están llevando a cabo en el marco del proyecto Horizonte 2020 NEXT - New Exploration Technologies (Nuevas Tecnologías de Exploración), financiado por la UE. El área de especialización del que nos han hablado para este artículo trata del análisis de la prospección mineral.

¿Podría contarnos un poco sobre el alcance y la finalidad del análisis de la prospección mineral?

El análisis de la prospección minera tiene como objetivo distinguir las zonas con un alto potencial minero de las que tienen un bajo potencial.

Los mapas de prospección resultantes muestran la variación del potencial mineral en una zona de estudio. Se utilizan, por ejemplo, en la exploración minera por parte de las empresas mineras, así como en la planificación del uso del suelo por parte del sector público. Las dos partes esenciales del análisis de la prospección minera son (1) la modelización conceptual de los sistemas minerales y (2) la modelización de la prospección minera. La modelización conceptual de sistemas minerales pretende ayudarnos a comprender los procesos geológicos que forman un yacimiento mineral de un tipo determinado. La modelización de las posibilidades de prospección minera implica generar un modelo matemático basado en las variables geocientíficas que representan los procesos de mineralización y predecir los valores

de prospección basados en este modelo. Además, existen varias fases de procesamiento de datos y análisis estadístico para apoyar el análisis. El análisis de las posibilidades de prospección se realiza habitualmente a escala regional, así como a escala de provincia y de cinturón, dependiendo del uso que se pretenda dar a los mapas.

El Centro de Investigación Geológica de Finlandia (GTK) ha desarrollado a lo largo de los años métodos para la modelización de las posibilidades de prospección y ha aplicado sistemáticamente la modelización de mineralizaciones en Finlandia y en el extranjero. Estos estudios se han llevado a cabo a escala regional, a escala de cinturón y también a escala más pequeña, de distrito a objetivo, y para varios sistemas minerales. Gracias a este esfuerzo, Finlandia está a la vanguardia en la modelización de la prospección minera y la evaluación de los recursos minerales en todo el país y, en particular, de la modelización de la mineralización del oro. Existen estudios a escala regional que cubren, por ejemplo, todo el Escudo Fenoscandinavo en el norte de Finlandia (Figura 1a y 1b), seguidos de estudios a escala de cinturón para cada uno de los importantes cinturones paleoproterozoicos, como el cinturón de Laponia central (gráfico 1c) y el cinturón de Peräpohja (gráfico 1d) dentro del Escudo Fenoscandinavo.

Además de las escalas regional, de provincia y de cinturón, también ha mencionado las escalas de campo y de objetivo. ¿Podría indicarnos la motivación de este enfoque adicional?

El mapa de posibilidades de prospección a escala regional del cinturón de Peräpohja (figura 1d) destaca la zona de Rompas-Rajapalot a escala de campo, más pequeña y con altas posibilidades de prospección, pero no proporciona suficientes detalles para identificar la mineralización real. Para producir un mapa de prospección más detallado a escala de campo o de objetivo, hay que tener en cuenta diferentes aspectos en comparación con la modelización a escala regional. Los estudios a escala regional se basan en el enfoque de los sistemas minerales. En consecuencia, se insiste mucho en identificar todos los componentes asociados a la formación (fuentes, vías y trampas) y la preservación de la mineralización.

Para explicar esto con más detalle, es bien sabido en nuestro campo de actuación que, para que una región sea explotable en cuanto a yacimientos minerales hoy en día, necesariamente debe mostrar evidencias de la presencia de todos los ingredientes esenciales que se requieren para la formación y preservación de esos yacimientos. Esto significa que requiere (1) fuente(s) de los metales, fluidos transportadores y energía para dirigir el sistema, (2) vías o conducto(s) a lo largo de los cuales los metales y los fluidos fueron transportados desde la fuente a una trampa, (3) trampas donde tiene lugar el(los) mecanismo(s) físico(s) y/o químico(s) que

depositaron los componentes minerales y (4) preservación, es decir, procesos que permitan la conservación de la mineralización en la corteza hasta el presente. Si falta alguno de estos ingredientes en una región, sus posibilidades de prospección minera serán bajas.

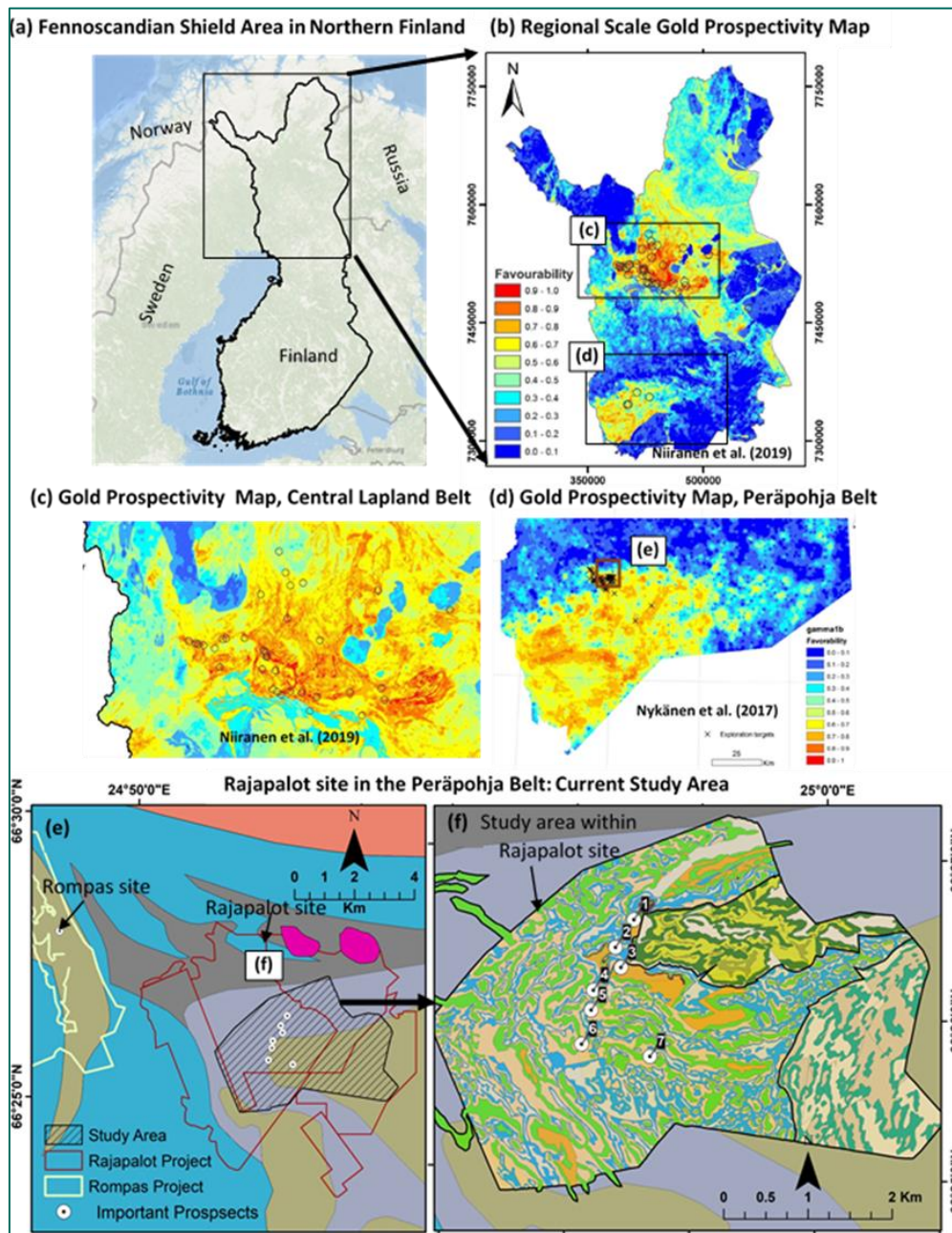


Gráfico 1: Mapas de posibilidades de prospección a diferentes escalas: estudios previos a escala regional y de cinturón para la mineralización de oro en Finlandia (cuadros a d). La zona de Rajapalot

(cuadros - e y f), situada dentro del cinturón de Peräpohja, es el área de estudio a escala de objetivo para identificar objetivos de exploración del terreno en el proyecto NEXT.

Todos estos componentes asociados a la mineralización se pueden cartografiar a escala regional y de cinturón. Una vez identificadas las regiones explotables a partir de los estudios a escala regional y de cinturón, se pueden realizar análisis de prospección más detallados a escala de campo o incluso a escala de objetivo más pequeño. En estas áreas de exploración más pequeñas, la señal del componente de la trampa solo se observa principalmente, porque su importancia supera a la de las fuentes y las vías. Esencialmente, esta diferencia en la importancia de los componentes del sistema mineral es lo que distingue un estudio a escala regional de un estudio a escala de campo o de objetivo.

En el proyecto NEXT, nos centramos en identificar las regiones trampa y los procesos geológicos asociados. La zona Rompas-Rajapalot comprende en realidad dos subtipos locales diferentes de mineralización: el estilo Rompas y el estilo Rajapalot. En NEXT, nos centramos especialmente en la modelización de prospección a escala de objetivos de la mineralización de oro en la zona del proyecto Rajapalot (gráfico 1e y 1f) para identificar las zonas de perforación con un alto potencial minero.

¿Podría contarnos más detalles sobre los enfoques y los métodos, que han empleado en esta investigación?

Nos propusimos obtener nuevos conocimientos sobre los procesos geológicos que operan en los componentes de las trampas de un sistema mineral de un modo sistemático y muy completo. Por esta razón, utilizamos diferentes métodos que generalmente se enmarcan, respectivamente, dentro de (1) la modelización de sistemas minerales, (2) las pruebas estadísticas de hipótesis geológicas y (3) la modelización de la prospección minera (véase el gráfico 2).

Para definir el modelo de sistema mineral, utilizamos los amplios conocimientos derivados de la literatura existente, así como los resultados obtenidos para la zona objetivo de Rajapalot a través de los estudios de campo realizados por los colegas de investigación en el proyecto NEXT, para contribuir a un modelo conceptual de mineralización. Esto nos permitió identificar los entornos favorables relacionados con las trampas y los procesos geológicos que los componen que conducen a la mineralización. Basándonos en estas ideas, formulamos varias hipótesis geológicas de los procesos de mineralización y dedujimos las correspondientes capas de prueba a partir de los conjuntos de datos geocientíficos disponibles.

Nuestro segundo paso implicó la comprobación estadística de las hipótesis geológicas formuladas sobre la base del modelo conceptual de mineralización. Utilizamos pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas, como la prueba T, la prueba Wilcoxon y la prueba Kolmogorov-Smirnov. El objetivo era comprobar si las capas de prueba podían distinguir las secciones obtenidas a partir de testigos de sondeos con mineralización de oro de las que tenían muy poco o ningún oro. A su vez, esto nos ayudó a identificar las capas de prueba más representativas que después sirvieron como aportaciones para los algoritmos estadísticos avanzados y de aprendizaje automático para la cartografía de prospección minera. Este segundo paso fue decisivo, porque lo que «aprende» el algoritmo de aprendizaje automático es muy sensible a lo que representan los datos de entrada. Por lo tanto, el objetivo principal era depurar los conjuntos de datos de entrada, de tal manera que mostraran una imagen integral de los entornos de mineralización, a los que luego se aplicó el algoritmo de aprendizaje automático.

En el tercer paso final, utilizamos métodos de aprendizaje automático supervisados y no supervisados para la modelización de la prospección minera. El método no supervisado utilizado fue el de los mapas de organización autónoma (SOM). Se implementó utilizando la aplicación de código abierto GisSOM ([Releases · gtkfi/GisSOM · GitHub](#)), desarrollada por GTK en el marco del proyecto NEXT. SOM es un método eficaz para generar una representación de baja dimensión (normalmente de 1 a 3 dimensiones) de datos de entrada multidimensionales/multivariantes. Mediante esta conversión de los datos de entrada al espacio SOM, se pueden identificar patrones geológicos, teniendo en cuenta únicamente la distribución de las variables geocientíficas de entrada y dejando de lado el aspecto espacial. Además, se pueden identificar poblaciones distintas en el conjunto de datos de entrada mediante la aplicación de la agrupación K-medias de los resultados obtenidos en el espacio SOM. La razón para implementar esta agrupación es que los dominios geoespaciales correspondientes a poblaciones específicas pueden, mediante interpretaciones visuales y evaluaciones estadísticas, estar relacionadas con las secciones de sondeos mineralizados, representando así áreas prospectivas. La transformación de los datos de entrada en el propio espacio SOM no requiere el uso directo de ningún dato de capacitación. Sin embargo, podemos aplicar una clasificación supervisada sobre los resultados del espacio SOM utilizando una red neuronal artificial (RNA). Este enfoque consistente en ejecutar una RNA sobre los resultados del SOM fue desarrollado por la empresa alemana Beak Consultants GmbH en la asociación NEXT. Encontrará más información sobre este enfoque en el artículo [NEXT promueve la cartografía predictiva de minerales con mapas de organización autónoma](#), por Andreas Brosig, que es el líder del equipo de modelización 3D en BEAK.

Para los más familiarizados con este campo de especialización, queremos destacar que, además de los métodos anteriores, también implementamos Sistemas de Inferencia Difusa (FIS, Fuzzy Inference Systems en inglés) y un Sistema de Inferencia Neuro Difusa Adaptativo (ANFIS, Adaptive Neuro Fuzzy Inference System en inglés) híbrido para la modelización de la prospección minera basada en el conocimiento. Además, se cuantificaron las incertidumbres de modelización relacionadas con la parametrización de las funciones de pertenencia del FIS mediante la ejecución del método de simulación de Montecarlo (MCS, Monte Carlo Simulations en inglés). Los FIS basados en MCS generaron mapas de posibilidades de prospección con distintos niveles de confianza. En el enfoque ANFIS, los parámetros del sistema fueron aprendidos por una red neuronal artificial en un entorno de aprendizaje híbrido utilizando el algoritmo de descenso de gradiente y estimadores de mínimos cuadrados.

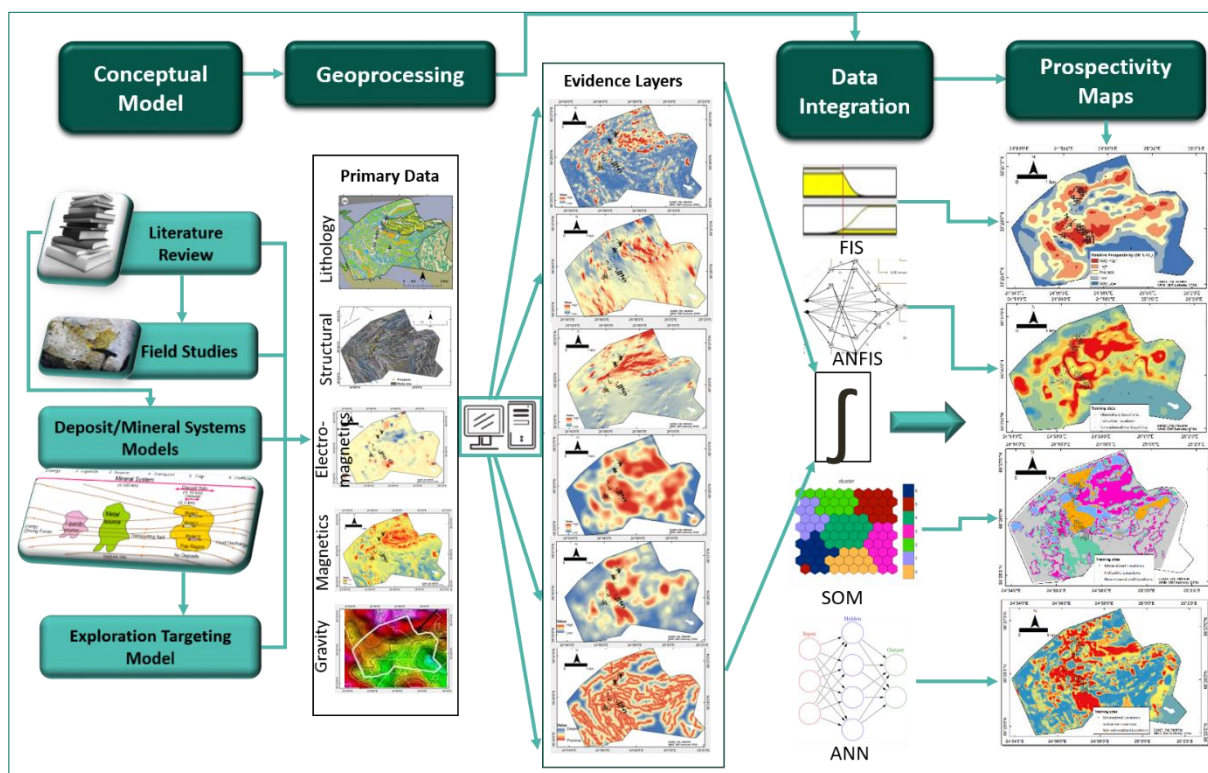


Gráfico 2: Flujo de trabajo y resultados de la modelización de la prospección minera

Claramente, la gama de métodos empleados ha sido amplia. Sobre la base de los resultados, ¿preferiría usted un método frente a otro o más bien ve la necesidad de adoptar un flujo de trabajo compuesto, en el que esencialmente mezclaría y combinaría todas estas metodologías distintas?

Normalmente, los modelos de exploración tienden a estar un tanto sesgados por los descubrimientos existentes. Especialmente los métodos basados en el aprendizaje automático de datos conducen a descubrimientos similares a los ya conocidos, porque el algoritmo de aprendizaje automático es propenso a aprender solo aquellas características y patrones que están presentes en los datos de entrenamiento. Por lo tanto, no podemos identificar nuevos subtipos de mineralización ni caracterizar los diversos controles sobre la mineralización. Dado que los sistemas minerales se forman como consecuencia de una importante interacción entre diferentes procesos geológicos, un mismo sistema mineral puede contener diferentes tipos de mineralización. En tales situaciones, los planteamientos basados en el conocimiento resultan especialmente útiles, ya que pueden centrarse en los procesos geológicos que forman el yacimiento en lugar de en las características geológicas asociadas a este. El aprendizaje automático también puede aplicarse a los planteamientos basados en el conocimiento, pero, en este caso, la máquina también aprende del conocimiento del geocientífico y no solo de los datos.

Por lo tanto, las razones de utilizar SOM no supervisado junto con métodos supervisados basados en el conocimiento y en los datos radicaban en poder:

- identificar patrones relacionados con la mineralización en los datos de entrada sin utilizar datos de entrenamiento
- delinear áreas prospectivas basadas en la comprensión conceptual de los procesos de mineralización aplicando el enfoque basado en el conocimiento, y
- reconocer las características de la mineralización representadas en los datos de entrenamiento y facilitar el aprendizaje de estos patrones mediante modelos basados en datos.

Y, sobre todo, a partir de este estudio llegamos a la conclusión de que los estudios de prospección minera pueden transformarse, de herramientas de predicción a escala regional, a herramientas de ayuda a la detección a escala de objetivo para identificar las áreas de perforación objetivo. Los resultados presentados aquí han enviado a la revista *Ore Geology Reviews* y los manuscritos están en proceso de revisión.

«La ciencia geológica está llena de ambigüedades e incertidumbres. La exploración de yacimientos minerales es una tarea exigente, pero apasionante. Sin embargo, con la mayoría de los grandes yacimientos ya descubiertos y explotados, actualmente es muy importante la búsqueda de nuevos yacimientos. Sin embargo, las complejas interacciones y la superposición de diversos procesos geológicos desde hace miles de millones de años, han llevado a su manifestación como fenómenos altamente estocásticos. La naturaleza no determinista de los procesos del sistema terrestre complica aún más el encaje de los modelos matemáticos en los datos geológicos. Sin embargo, precisamente estas nociones siguen estimulando mi interés por comprender mejor estos sistemas. Los avanzados enfoques de modelización actuales acuden al rescate para identificar patrones hasta ahora ocultos. Interpretar los resultados de nuestra modelización es como revelar la historia que los datos han intentado contarnos todo el tiempo. Con mi formación en geología y mi experiencia en el análisis de datos geocientíficos, la integración de datos, el aprendizaje automático y la modelización matemática, intento desentrañar los enigmáticos procesos que pueden haber contribuido a la formación de depósitos minerales en la Tierra».



Bijal Chudasama es investigadora científica posdoctoral en el equipo de geoinformática y análisis de datos geocientíficos del Centro de Investigación Geológica de Finlandia (GTK)



«Como muchos otros, empecé observando el entorno de la superficie de nuestra pequeña Tierra. Era evidente que en ella ocurren muchas cosas que nosotros, como humanos, no podemos observar directamente. Al final, la respuesta a todo parecía estar siempre en la física y la química. Debido a mi interés en la física, hice un recorrido un poco más allá, hacia el Sistema Solar y más allá. Entre otras muchas cosas, fue emocionante modelar las propiedades físicas de los asteroides, vistos solo como diminutos puntos en las imágenes tomadas desde la Tierra. También me resultó estimulante, en algunos casos raros, comparar el modelo con la forma real y el estado de giro de un asteroide captado en imágenes por una nave espacial. Tras aterrizar de nuevo en la Tierra, empecé a investigar bajo la superficie terrestre. ¿Cómo podemos saber qué debajo de nosotros sin ir realmente allí? Aunque el objetivo de estudio está realmente cerca en comparación con un asteroide o una galaxia

lejana, no podemos llegar fácilmente. Lo que hacemos es lo mismo que en los problemas astronómicos: encontrar un modelo que describa el objetivo con parámetros que podamos medir desde la superficie de la Tierra y por encima. En este terreno de juego es donde me siento a gusto: trabajando con números y funciones

e intentando organizarlos con la ayuda de la física y la química, que siempre se ha sabido que están implicadas de alguna manera».

Johanna Torppa is a Senior Scientist in the geoinformatics and geoscientific data analyses team at the Geological Survey of Finland (GTK)

Más información sobre NEXT:

www.new-exploration.tech

