

INFORME TÉCNICO

UNA RUTA BASADA EN DATOS PARA OBTENER MODELOS GEOLÓGICOS CONFIABLES

Cómo Driver y Leapfrog ayudan a los geólogos a descubrir, validar y modelar con mayor confianza



Resumen ejecutivo	03
<hr/>	
CAPÍTULO 1 Por qué la interpretación estructural necesita un enfoque más basado en datos	04
<hr/>	
CAPÍTULO 2 Cómo cuantifica Driver la continuidad geológica local	06
<hr/>	
CAPÍTULO 3 Aplicación de Driver en los flujos de trabajo de modelado geológico	09
<hr/>	
Conclusión	23
<hr/>	



Resumen ejecutivo

Comprender las características geológicas que controlan la estructura de un yacimiento mineral es fundamental para construir un modelo sólido. La geología estructural desempeña un papel esencial, ya que ayuda a los geólogos a comprender las relaciones geológicas y a definir las continuidades espaciales que sustentan un modelo y una estimación de recursos de alta calidad. Sin embargo, en muchos flujos de trabajo, obtener información estructural confiable que respalde la interpretación del yacimiento sigue siendo un desafío. Desentrañar la continuidad de las características geológicas presentes en datos de perforación dispersos es fundamental para comprender y modelar los yacimientos, pero rara vez se cuantifica de una forma que pueda utilizarse para alimentar los modelos de manera directa (Sinclair y Valee, 1994; Reid y Cowan, 2023).

Driver, a través de un flujo de trabajo conectado con Leapfrog, aborda esta carencia al cuantificar la continuidad geológica local de forma directa a partir de los datos de perforación. Mediante el aprendizaje automático, identifica las tendencias estructurales integradas en la configuración espacial de los ensayos y la litología y la alteración registradas, y las convierte en resultados prácticos que los geólogos pueden examinar, interpretar y aplicar. De este modo, Driver proporciona un flujo de trabajo cuantitativo y basado en datos para la interpretación estructural de yacimientos, con resultados que reducen el esfuerzo manual necesario para construir modelos basados en la estructura y actualizarlos a medida que se dispone de nuevos datos.

Este informe explica por qué la interpretación de yacimientos estructurales requiere un enfoque basado en datos, cómo Driver cuantifica la continuidad geológica y cómo esos conocimientos pueden utilizarse en los flujos de trabajo de descubrimiento, modelado y estimación. Basándose en ejemplos del mundo real y en estudios de casos, muestra cómo Driver genera modelos con mayor realismo geológico y ayuda a los geólogos a identificar, evaluar y aplicar patrones estructurales que, de otro modo, seguirían siendo difíciles de utilizar.



CAPÍTULO 1

Por qué la interpretación estructural necesita un enfoque más basado en datos

El modelado geológico siempre se ha basado en la interpretación de expertos. Esto sigue siendo esencial, pero también genera limitaciones. En la mayoría de los flujos de trabajo, los geólogos deben tomar una larga serie de decisiones que traduzcan las observaciones de los datos geológicos, las interpretaciones y la comprensión de los yacimientos en entradas de software que, en última instancia, transformen los datos en un modelo digital funcional (Kentwell, 2019). Leapfrog ha agilizado de manera considerable la generación de superficies y volúmenes, pero la interpretación de los datos y las características sigue dependiendo, en gran medida, del usuario. A medida que los conjuntos de datos se hacen más grandes, densos y complejos, esa dependencia se vuelve cada vez más difícil de gestionar.

Tener más datos no ha hecho que el modelado se base más en los datos de forma automática

Un mayor volumen de datos de perforación debería brindar la oportunidad de construir modelos que respondan mejor a los propios datos (Sinclair y Blackwell, 2002). En la práctica, sin embargo, las interpretaciones estructurales a veces se establecen en una fase temprana y luego se mantienen sin revisiones ni actualizaciones periódicas. A medida que el modelo se enriquece con más datos, cuestionar la interpretación original suele resultar menos práctico en lugar de más.

Este riesgo da lugar a un flujo de trabajo en el que pueden persistir sesgos iniciales, los ajustes manuales aumentan la fatiga en la toma de decisiones y el modelo se vuelve más difícil de escalar y defender de manera cuantitativa. El resultado es una dependencia significativa de la interpretación humana inicial, incluso cuando los nuevos datos deberían respaldar una representación digital más detallada y objetiva.

La continuidad es fundamental, pero difícil de captar con precisión

Uno de los mayores desafíos a la hora de construir modelos geológicos cuantitativos es la representación realista de la continuidad geológica.

La continuidad describe cómo las características intersectadas por los pozos individuales en realidad están conectadas en el espacio tridimensional. Rige la geometría de las unidades geológicas y la forma en que se distribuye la ley en todo el yacimiento (Sinclair y Valee, 1994). Por lo tanto, una comprensión sólida de la continuidad es fundamental tanto para la calidad del modelo como para la confiabilidad de los recursos.

La continuidad en sí misma es difícil de cuantificar de forma directa. Se puede inferir a partir de observaciones estructurales en el fondo del pozo, como la orientación de las vetas, la estratificación o la foliación, pero estos conjuntos de datos suelen ser inconsistentes y pueden no representar la continuidad a una escala significativa para la construcción de un modelo representativo.

Para complicar aún más las cosas, la geología rara vez es uniforme en todo un yacimiento (Stoch et al., 2022). La mayoría de las características geológicas muestran una fuerte dependencia direccional (anisotropía), y los cambios en la orientación primaria suelen producirse a escala local (por ejemplo, estratigrafía plegada y deformada, redes complejas de vetas y formas irregulares de los yacimientos). Los modelos que reconocen e incorporan la continuidad local tienden a reflejar mejor la realidad geológica (Martin et al., 2019).

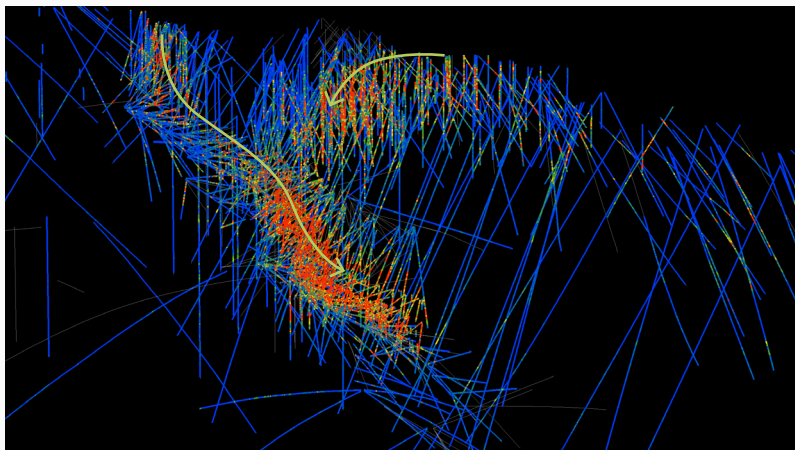


FIGURA 1: Continuidad local expresada en los datos de análisis de ley obtenidos de las perforaciones. Los patrones a escala del yacimiento (flechas verdes) visibles en estos datos pueden aportar información importante sobre las características estructurales que determinan la distribución del yacimiento.



CAPÍTULO 2

Cómo cuantifica Driver la continuidad geológica local

Driver está diseñado para ayudar a los geólogos a cuantificar la continuidad geológica local de forma directa a partir de los datos de perforación. Su método principal, el mapeo de continuidad espacial (SCM, por sus siglas en inglés), es un algoritmo de aprendizaje automático no supervisado que detecta y mide la continuidad dentro de conjuntos de datos geológicos en 3D. El SCM selecciona ubicaciones estratégicas de análisis a partir de los datos de perforación y, en cada ubicación, mide y modela la continuidad geológica espacial de muestras similares dentro del área circundante.

Los resultados se expresan como una serie de elipsoides locales, cada uno de los cuales representa la orientación predominante y la extensión de la continuidad en un punto determinado. En conjunto, en todo el yacimiento, estos elipsoides representan un campo de anisotropía localmente variable (LVA, por sus siglas en inglés) que los geólogos pueden examinar, interpretar y utilizar en flujos de trabajo posteriores (p. ej., Stoch et al., 2022).

El mapeo de continuidad espacial de Driver puede aplicarse a atributos numéricos escalares, tales como los resultados de análisis, así como a información categórica, por ejemplo, la litología registrada o los códigos de alteración. Cuando se aplica a datos relacionados con la mineralización, revela los controles estructurales locales sobre la continuidad de la ley. Cuando se aplica a datos categóricos, pone de relieve características tales como la estratificación, la geometría de las intrusiones, la orientación de las vetas y los desplazamientos de las fallas. En cada caso, el objetivo es el mismo: extraer patrones estructurales de los datos de forma directa en lugar de definirlos de forma manual.

Cómo funciona el mapeo de continuidad espacial

El SCM procesa datos de puntos 3D atribuidos o de intervalos de perforación. En el análisis geológico, estos datos suelen representar muestras de perforación del subsuelo registradas con información como unidades estratigráficas, litologías de vetas o análisis geoquímicos.

A las muestras que representan la característica de interés, como una litología específica o una ley superior a un umbral de corte elegido, se les asigna un valor de 1, mientras que a todas las demás muestras se les asigna un 0. Antes del análisis, los datos suelen compositarse en el pozo en intervalos de longitud regular para reducir el ruido de alta frecuencia, al tiempo que se conservan las características geológicas esenciales relevantes para la interpretación y el modelado.

El flujo de trabajo del SCM se desarrolla en tres pasos clave: i) selección del centro, ii) cartografía de continuidad, y iii) aprendizaje de la anisotropía.

En primer lugar, se selecciona un subconjunto de muestras como centros de análisis para distribuir los puntos de forma semirregular por toda el área de interés. En cada centro, el SCM agrega las muestras cercanas que superan el umbral definido por el usuario para cartografiar la continuidad local presente en los datos circundantes. Esto genera un elipsoide de anisotropía representativo que delimita la extensión y la orientación de la continuidad que rodea al centro de análisis.

Cada elipsoide captura los ejes principales (expresados como buzamiento, dirección de buzamiento y paso), y los límites (rangos) de la continuidad local, e incluye métricas de calidad tales como la confianza del modelo y el respaldo de los datos.

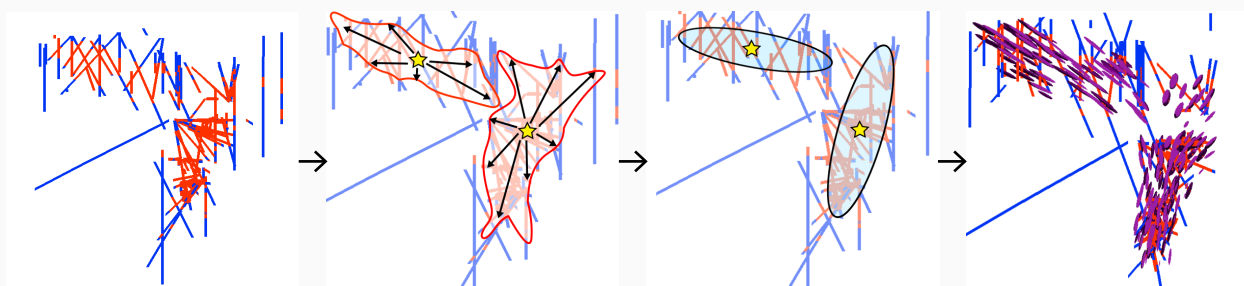


FIGURA 2: El algoritmo SCM para modelar la continuidad local en función de los datos de perforación atribuidos.

La confianza se calcula como la proporción del espacio angular alrededor del centro que contiene información 3D, mientras que el respaldo de los datos registra el número de muestras únicas que contribuyen al análisis en esa ubicación. En conjunto, estos resultados les proporcionan a los geólogos métricas cuantificadas para evaluar la fiabilidad de cada resultado local.

En lugar de utilizar la variografía tradicional para interpretar la continuidad espacial en un dominio más amplio, el SCM aprende la geometría local de la continuidad de forma directa de la disposición espacial de los datos atribuidos.

Driver representa la continuidad como elipsoides locales, ya que estos ofrecen una forma flexible de describir características geológicas con firmas espaciales complejas. Bajo un marco único y unificado, los elipsoides pueden representar las geometrías geológicas más comunes, como las características planas (p. ej., capas estratigráficas o vetas) y las características lineales (p. ej., clavos mineralizados o ejes de pliegues inclinados), y cuantificar la continuidad geométrica en una forma que pueda inspeccionarse de manera visual y trasladarse a flujos de trabajo posteriores.

Una extensión relacionada del SCM es la clasificación automatizada de elipsoides basada en su proximidad espacial y sus propiedades anisotrópicas, incluidas la orientación, el tamaño y la forma. Integrada de forma directa con el SCM, esta capacidad de agrupación utiliza una técnica de propagación de aprendizaje automático semisupervisado para identificar grupos de muestras con consistencia espacial y anisotrópica. El algoritmo se basa en la propagación iterativa para producir agrupaciones que siguen geometrías curvilíneas, como pliegues, y delimitan los límites de decisión de posición en áreas donde la continuidad cambia con rapidez. El algoritmo es en gran medida no paramétrico, lo que significa que los usuarios no necesitan definir el número de clústeres por adelantado. En su lugar, aprenderá las asociaciones a partir de la configuración espacial de los datos y del campo de continuidad generado por el SCM, y al mismo tiempo permitirá a los usuarios ajustar la tolerancia angular en las conexiones entre elipsoides cercanos.

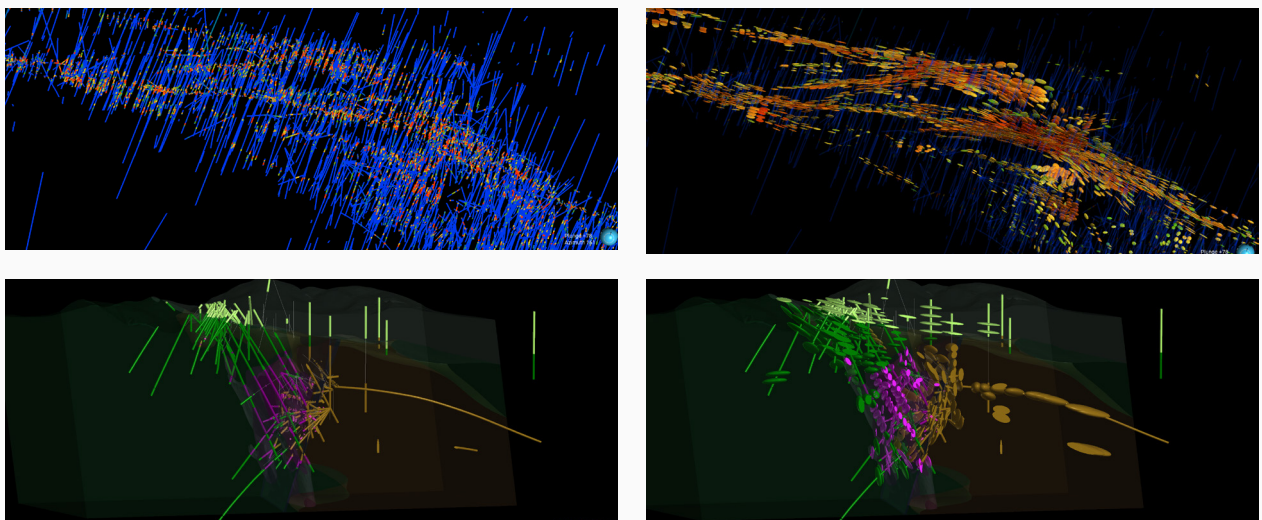


FIGURA 3: Ejemplos de resultados del análisis SCM sobre la continuidad local de las vetas auríferas (Au, arriba) y las unidades litológicas registradas en los datos de perforación (abajo).



CAPÍTULO 3

Aplicación de Driver en los flujos de trabajo de modelado geológico

El valor de Driver reside en cómo se utilizan sus resultados: para validar o descubrir características geológicas, construir modelos implícitos mejorados y respaldar flujos de trabajo de estimación que dependen de la anisotropía basada en datos.

01 Datos estructurales para la validación y el descubrimiento geológicos

Los datos de continuidad generados por Driver constituyen una forma de información estructural que representa las tendencias geológicas primarias integradas en la información de perforación. Pueden ayudar a los geólogos a identificar características que quizá no hubieran reconocido antes o a confirmar que una interpretación existente de verdad está respaldada por los datos disponibles. Esto hace que Driver resulte útil no solo para encontrar nuevas oportunidades, sino también para poner a prueba ideas estructurales y tomar decisiones sobre dominios de forma explícita y con mayor confianza.

Validación geológica en Golden Cross, Coromandel, Nueva Zelanda

Un ejemplo del apoyo de Driver a la validación de la interpretación estructural proviene del yacimiento de oro y plata Golden Cross en Coromandel, Nueva Zelanda. El yacimiento contiene dos zonas de mineralización principales: la zona Empire, de buzamiento pronunciado, y la zona Stockwork occidental, de menor buzamiento (Begbie et al., 2007).

Driver se aplicó de forma directa a los datos de ley de oro, donde generó un conjunto de elipsoides locales que revelaron complejidad, incluida una serie de ramificaciones de vetas mineralizadas en la zona del muro inferior de la veta Empire. Si bien estas ramificaciones se señalaron en algunas de las interpretaciones originales de secciones transversales, su reproducción independiente mediante la continuidad derivada directamente de los ensayos proporciona una importante validación de dicha interpretación geológica. Esto refuerza las decisiones de delimitación de dominios geológicos y ofrece un vínculo sólido entre el modelo conceptual y los patrones empíricos presentes en los ensayos de ley.

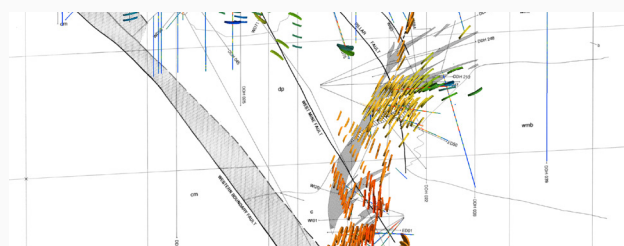


FIGURA 4: Características geológicas delimitadas mediante el mapeo de continuidad espacial en la mina Golden Cross, Coromandel, Nueva Zelanda.

Descubrimiento geológico en la explotación de Waihi de OceanaGold

Los resultados estructurales de Driver también pueden respaldar el descubrimiento de características de importancia económica dentro de los conjuntos de datos de yacimientos. En la explotación subterránea de OceanaGold en Waihi, Driver ayudó al equipo de geología a identificar una ramificación de veta que no se había modelado antes.

Al trabajar en un sistema epitermal de gran complejidad geológica con múltiples áreas mineras y explotaciones históricas, el equipo utilizó Driver para analizar el conjunto de datos de perforación de recursos y generar elipsoides que captaran la orientación y la distribución de la continuidad local en las estructuras mineralizadas. Al compararla con los datos geológicos conocidos y los datos de control de minerales subterráneos, la interpretación de Driver presentó una estrecha coincidencia con la arquitectura de vetas observada, lo que dio al equipo la confianza necesaria para seguir investigando.

La información clave surgió cuando Driver destacó un grupo de elipsoides en una zona en la que aún no se había modelado ninguna veta. Esto apuntaba a la presencia de una estructura mineralizada que se ramificaba desde el yacimiento principal. A continuación, el equipo validó esa interpretación comparándola con una galería minera existente, tras revisar la información subterránea y confirmar que el patrón estructural identificado por Driver era real y viable. Una vez confirmada, la ramificación se representó mediante un método de diseño estructural, se estimó y se incorporó al flujo de trabajo de planificación minera. Desde la revisión inicial hasta obtener un modelo de bloques estimado en su totalidad y listo para la planificación transcurrió alrededor de una hora.



El resultado fue inmediato y cuantificable. OceanaGold identificó una fuente de valor que se había pasado por alto con anterioridad, y señaló más de 2000 onzas adicionales de oro, de las cuales ya se han recuperado más de 100. En este caso, Driver ayudó a revelar una tendencia estructural sutil pero de gran relevancia económica y respaldó un modelo más completo que presentaba un vínculo más estrecho con las características inherentes a los datos.

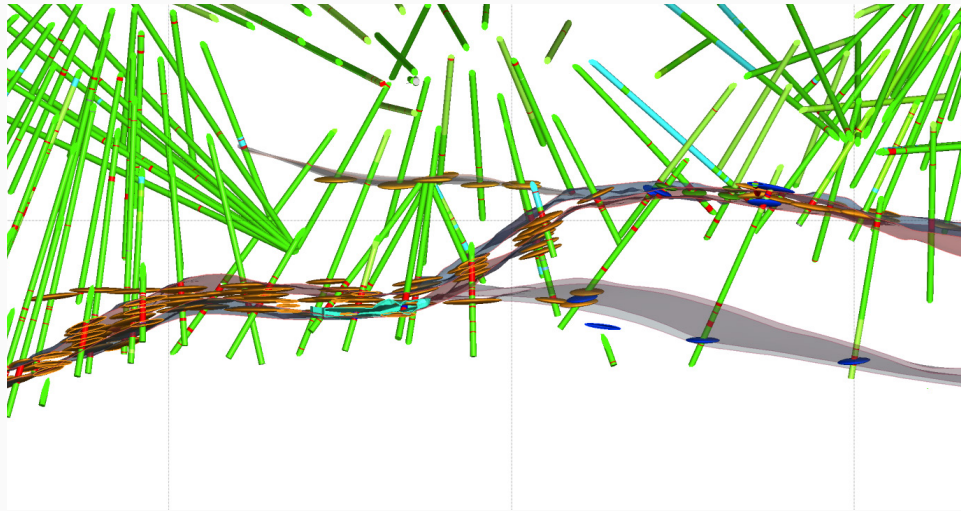


FIGURA 5: Elipsoides de control que resaltan las orientaciones de las vetas principales y de las ramificaciones, derivadas del conjunto de datos de perforaciones de exploración.

[Leer caso práctico completo →](#)



02 Análisis de continuidad categórica y validación geológica

El SCM puede aplicarse de forma directa a datos categóricos, lo que ofrece una vía eficaz para cuantificar las relaciones geométricas espaciales dentro de la información de pozos registrada, como la litología y las agrupaciones de alteraciones hidrotermales. Al dividir los datos en clases de indicadores que representan cada categoría, el algoritmo es capaz de cartografiar la extensión local de la continuidad, y generar conjuntos de elipsoides codificados que pueden evaluarse o utilizarse para informar a los modelos posteriores.

Desentrañando las relaciones entre ley y litología en un conjunto de datos de un yacimiento orogénico

En el yacimiento aurífero orogénico de Sigma-Lamaque, Canadá, se utilizó el análisis SCM categórico para desentrañar las asociaciones entre la roca huésped y la ley de las vetas mineralizadas de oro y los diques félsicos a intermedios.

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis de la continuidad del oro para establecer una línea de referencia representativa de la distribución local de las muestras que arrojaban leyes elevadas. A continuación, se generó un conjunto de elipsoides para cada unidad rocosa registrada, y los resultados se compararon en cortes visuales en Leapfrog. El método ofrece una forma de comparar de manera directa las relaciones de continuidad estructural entre la ley y las diferentes litologías de la roca huésped.

A partir de este enfoque, queda claro que la distribución de los diques félsicos a intermedios muestra una fuerte asociación local con las tendencias de las vetas mineralizadas subverticales; sin embargo, dichos diques muestran una asociación débil con el conjunto predominante de bandas mineralizadas de buzamiento superficial.

Este es un ejemplo de una observación que proporciona pruebas importantes para comprender las relaciones geológicas necesarias para un modelado fiable y la definición del dominio de recursos. Las asociaciones entre la roca huésped y la ley en Sigma son complejas, y presentan relaciones de características localizadas que dependen de la competencia de la roca y de la proximidad a las vías de los fluidos mineralizadores. Estos fluidos explotaron los diques félsicos a intermedios como vetas de cizalla mineralizadas, pero utilizaron otras rocas huéspedes (por ejemplo, diorita primitiva) para formar las zonas de vetas extensionales con menor buzamiento (Cowan, 2020).

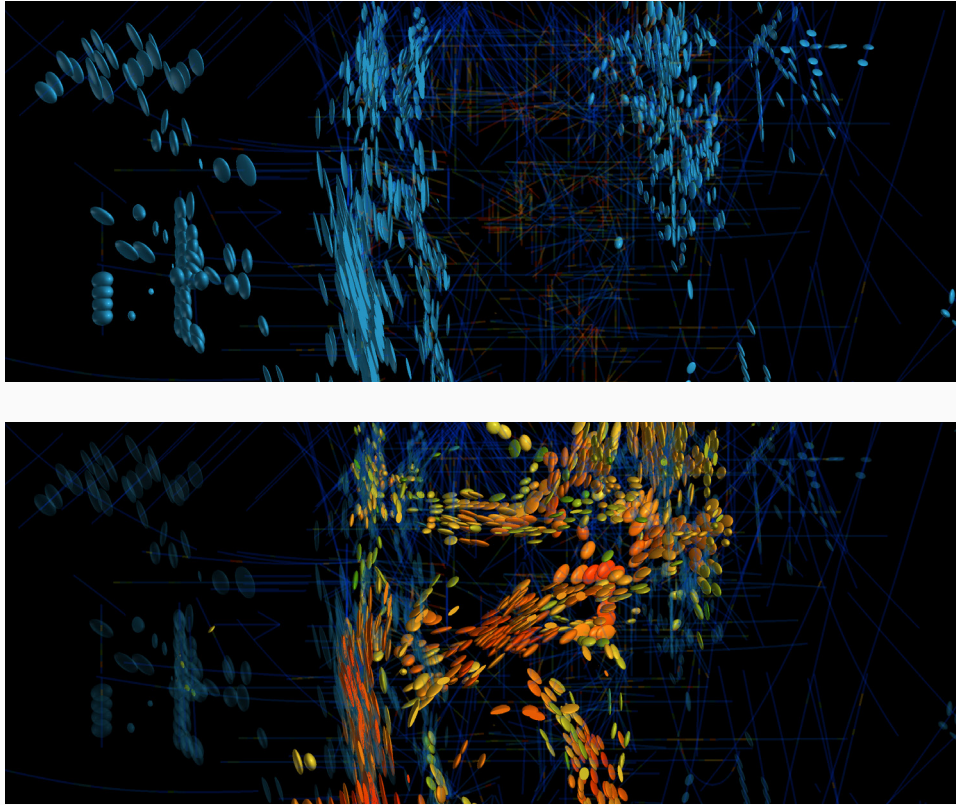


FIGURA 6: Análisis de continuidad de categorías mediante el factor utilizado para interpretar las relaciones litológicas con una ley elevada de oro. Los discos estructurales de color azul claro representan las orientaciones locales de los diques de composición félsica a intermedia. Los elipsoides multicolores representan concentraciones elevadas de oro, con colores que indican el nivel de confianza del análisis.

03 Modelado implícito optimizado

La geología rara vez es simple, y las tendencias globales a menudo no logran captar la compleja continuidad local de los yacimientos reales (Stoch et al., 2022). Aunque Leapfrog ofrece herramientas para influir en la anisotropía local, estos controles deben seguir construyéndose de forma manual y revisándose a medida que evolucionan los datos y el modelo.

Driver automatiza este proceso mediante el SCM para generar restricciones de continuidad objetivas y adaptables a nivel local de manera directa a partir de los datos de perforación. Genera un campo elipsoidal de auditabilidad completa que capta el estado triaxial local de continuidad, el cual los geólogos pueden revisar, filtrar y refinar antes de incorporarlo como restricciones en su modelo implícito.

Este flujo de trabajo es posible gracias a la herramienta de tendencia estructural de mezcla triaxial de Leapfrog. Esta tendencia conserva la salida 3D completa de Driver, incluidas las geometrías planas y lineales, y se utiliza para influir en la salida generada por el motor de interpolación RBF de Leapfrog. El resultado es una vía directa desde la continuidad cuantificada hasta modelos implícitos geológicamente plausibles y de alta capacidad de respuesta.

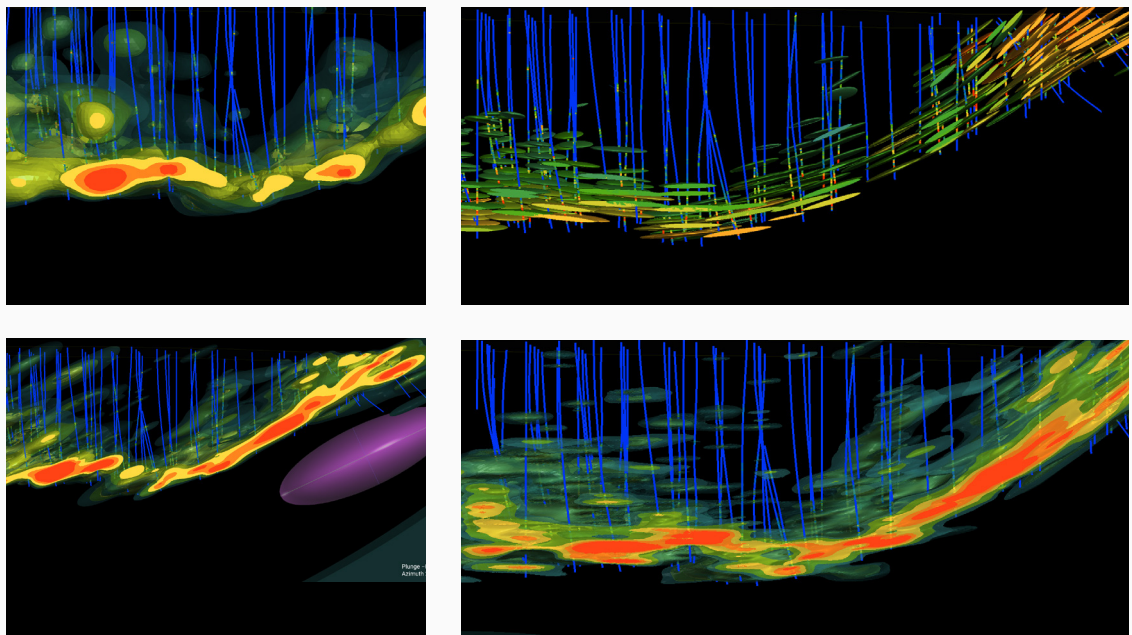



FIGURA 7: Flujo de trabajo de Driver-Leapfrog que muestra cómo los elipsoides locales generados por Driver pueden utilizarse para alimentar modelos numéricos implícitos en Leapfrog. Modelos numéricos en Leapfrog con tendencia isotrópica y global (izquierda); Elipsoides locales generados a partir de factores determinantes y modelo basado en la tendencia estructural con combinación triaxial (derecha).



Mejora de las representaciones de modelos implícitos de SRK en un yacimiento de oro heredado

SRK Consulting aplicó Driver a un yacimiento aurífero alojado en una falla de cizallamiento en el que el modelado histórico se había basado en una hipótesis inicial sobre la tendencia de la mineralización en toda el área del yacimiento: que la mineralización presentaba una tendencia constante en un rumbo y un buzamiento “globales”. Con los nuevos datos de perforación disponibles, SRK deseaba revisar esta interpretación estructural y actualizar los modelos en Leapfrog para respaldar una nueva estimación de recursos. Una primera revisión de los datos mostró que, si bien la interpretación heredada era aceptable como aproximación inicial, no reflejaba de forma adecuada las características estructurales locales más complejas del yacimiento, incluidos varios cambios locales importantes en el buzamiento, discontinuidades abruptas en la ley y amplias estructuras similares a pliegues.

Se utilizó Driver a fin de poner a prueba la hipótesis estructural anterior y determinar si se podía emplear un modelo de continuidad más representativo a nivel local para respaldar una nueva generación de modelos de dominio basados en la ley y adaptados a los fines previstos. SRK generó varios análisis SCM para examinar la continuidad en diversos umbrales de ley, y a continuación seleccionó un objeto elipsoidal local representativo para pasarlo a Leapfrog con el fin de su interpretación e inclusión en el modelo actualizado.

El análisis de Driver validó, en términos generales, la interpretación heredada, pero también reveló una complejidad estructural que no estaba representada en la estimación original. Los elipsoides locales indicaron un amplio sinclinal abierto en la parte norte del yacimiento, múltiples áreas en las que los buzamientos de las zonas de cizallamiento locales se desviaban en más de 10-15 grados de la tendencia principal, y, lo que es más importante, un pronunciado aumento de la inclinación de la continuidad en el área de expansión minera propuesta. En el modelo original, no se había captado ninguna de estas variaciones locales.

Tras filtrar los elipsoides con baja confianza y métricas de respaldo de datos deficientes, SRK utilizó los elipsoides locales y la tendencia estructural de mezcla triaxial de Leapfrog para generar una serie de volúmenes indicadores basados en la ley, los cuales mostraron una clara mejora con respecto a la interpretación anterior. Las superficies guiadas por Driver presentaron mayor coherencia estructural, más flexibilidad a nivel local y más fidelidad a la geometría sugerida por los datos de perforación, lo que permitió definir con claridad tanto la estructura de continuidad empinada en el área minera propuesta como el amplio sinclinal observado en el norte. Es importante destacar que esto se logró en cuestión de minutos y con una intervención manual mucho menor que con un enfoque convencional.

[Leer caso práctico completo →](#)

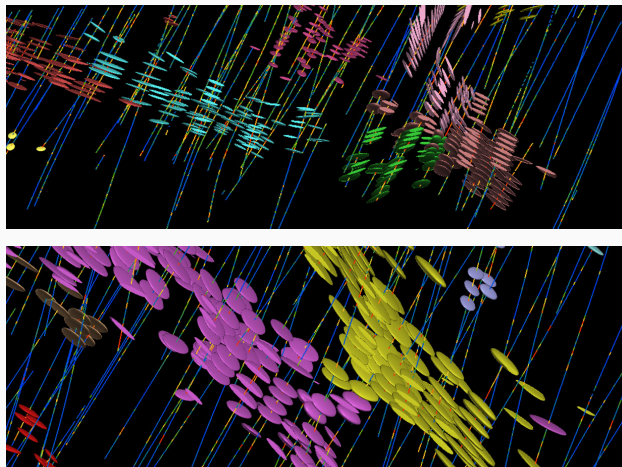


FIGURA 8: Resultados del SCM coloreados según agrupaciones automáticas en clústeres, que muestran una estructura de continuidad pronunciada en el pozo de expansión propuesto (arriba) y cizallas con buzamiento en la región occidental del yacimiento (abajo).

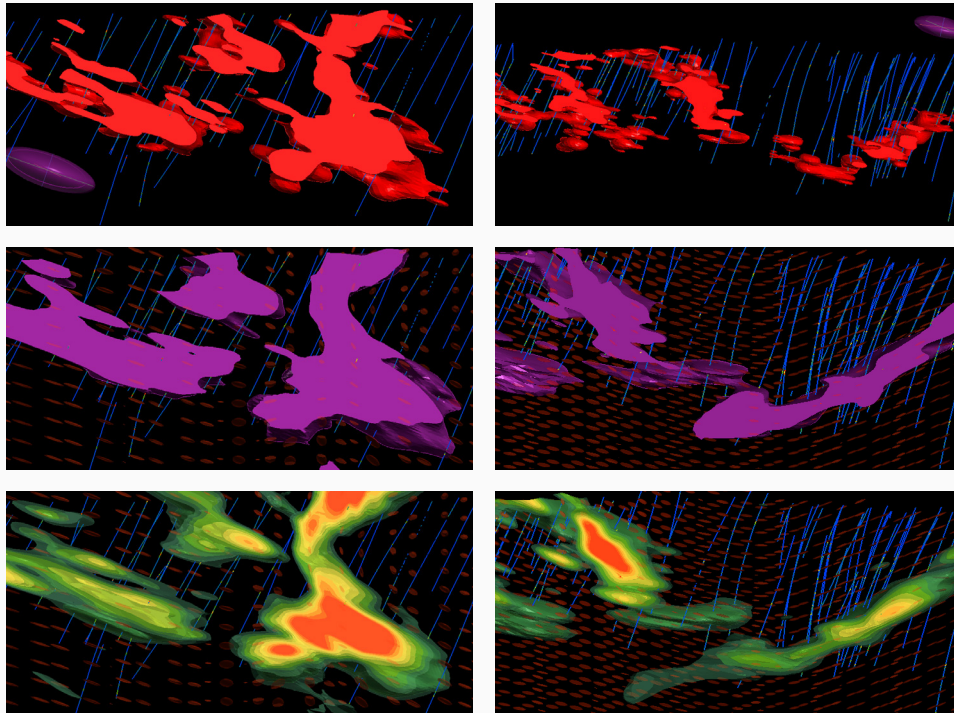


FIGURA 9: Comparación entre los modelos numéricos y de dominio implícito de Leapfrog, elaborados a partir de la tendencia estructural de mezcla triaxial descrita por Driver (colores morados y cálidos), y el modelo global de buzamiento tradicional (rojo). Los resultados revelan una estructura de continuidad local con buzamiento pronunciado en la zona minera propuesta (izquierda) y una amplia estructura de sinclinal abierta (derecha).

04 Agrupación automática de elipsoides SCM para la delimitación de dominios estructurales

La función de agrupación de Driver transforma el análisis de continuidad en un punto de partida rápido y cuantitativo para la interpretación de dominios basada en datos, la preparación de datos de modelos y el análisis exploratorio.

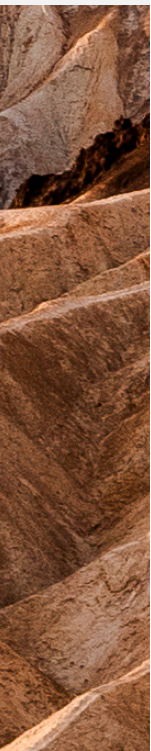
Utiliza una técnica de propagación de aprendizaje automático semisupervisado para identificar grupos de muestras que presentan consistencia espacial y anisotrópica. Los clústeres de elipsoides generados por SCM pueden interrogarse de forma directa o evaluarse de nuevo con respecto a los datos de perforación originales, lo que les permite a los geólogos seleccionar con rapidez los intervalos que corresponden a las vetas individuales y los dominios estructurales necesarios para el modelado posterior en Leapfrog.

Generación de asociaciones automáticas de vetas para un yacimiento de oro epitermal

Los yacimientos de oro epitermal suelen presentar configuraciones de vetas de cuarzo con una geometría compleja, como bifurcaciones, ramificaciones e intersecciones de vetas. Resulta complicado captar esta complejidad dentro de los propios registros litológicos de fondo de pozo, que por lo general solo recogen los detalles básicos y etiquetan ciertos intervalos como vetas que contienen sulfuros frente a roca huésped estéril.

Esto plantea un desafío para el modelado implícito, ya que las vetas individuales aún deben separarse y modelarse de manera independiente. De forma tradicional, esto requiere una selección manual de intervalos y una asignación interpretativa a clases de vetas, lo que hace que una reinterpretación a gran escala resulte lenta y poco práctica.

Driver agiliza este flujo de trabajo al detectar las tendencias de las vetas mediante el análisis de continuidad y agruparlas allí donde la continuidad se rompe, se desplaza o se interrumpe. A continuación, estos agrupamientos se asignan de forma directa a los intervalos de perforación de entrada para la construcción automatizada de vetas en Leapfrog. Aplicado a este ejemplo de yacimiento epitermal, Driver clasificó con rapidez más de 65 000 intervalos de muestreo en 31 agrupaciones de vetas independientes, ocho de las cuales fueron seleccionadas para ser modeladas como vetas auríferas primarias. Los resultados reflejan con fidelidad el modelo construido de forma manual, lo que ofrece a los geólogos un flujo de trabajo alternativo y rápido para el modelado de vetas, así como la confianza de que las decisiones sobre el dominio están bien respaldadas por los datos 3D disponibles.



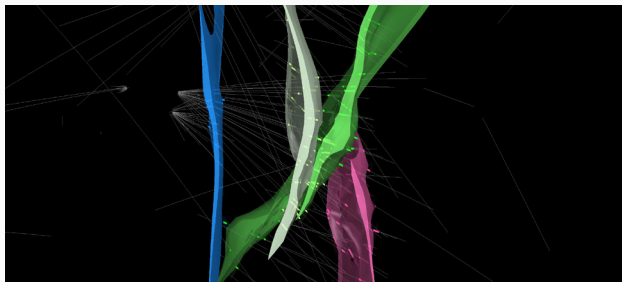
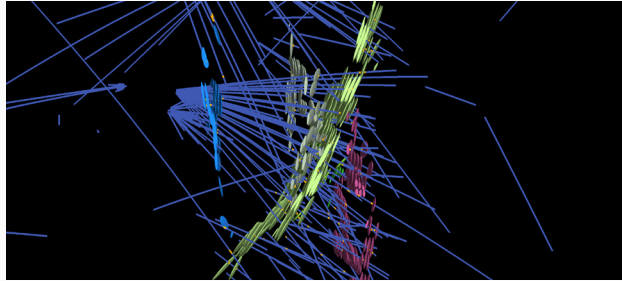
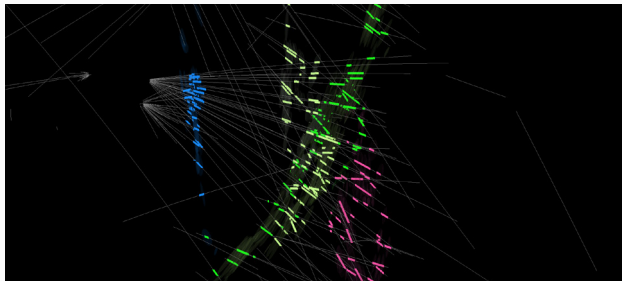
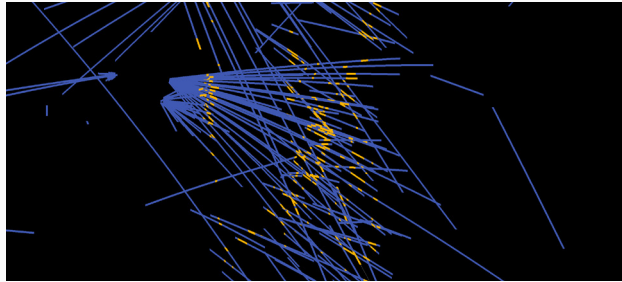


FIGURA 10: Agrupación por continuidad utilizada para delimitar vetas en un yacimiento de oro epitermal. La primera imagen muestra los datos brutos registrados como vetas que contienen sulfuros. La segunda y la tercera imagen muestran los elipsoides agrupados y ajustados a los intervalos de perforación de entrada. La última imagen muestra un modelo de veta de Leapfrog construido a partir de ocho de los clústeres seleccionados generados por Driver.

05 Anisotropía que varía de forma local y que respalda la geoestadística avanzada

Los resultados de continuidad de Driver también pueden respaldar la geoestadística avanzada, sobre todo cuando la estimación depende de la anisotropía que varía localmente (LVA, por sus siglas en inglés). No es imposible el modelado manual de las tendencias de ley que varían de manera local, pero su construcción requiere mucho tiempo y su mantenimiento resulta complicado, sobre todo cuando los geólogos digitalizan superficies de malla y estiman la geometría a simple vista.

Driver proporciona una base rápida y basada en datos para la estimación de la LVA mediante la generación de elipsoides e información estructural de forma directa a partir de la continuidad de los pozos. Los resultados pueden utilizarse para optimizar el modelado de dominios, como prueba independiente de la estacionariedad geométrica y como controles de orientación locales que influyen en la construcción de la malla implícita y el interpolante de forma de Leapfrog, lo cual puede utilizarse para controlar la estimación de la orientación variable de la ley.

Estimación rápida de la anisotropía de variación local (LVA) del azufre en el yacimiento de Babbitt

El yacimiento de Babbitt es un gran yacimiento de Cu-Ni de baja ley situado en Minnesota, Estados Unidos. La mineralización de sulfuro se encuentra alojada en rocas gabroicas en la base de la secuencia, en su mayoría a lo largo de una banda estrecha que sigue un contacto basal con ondulación gradual con metasedimentos no mineralizados (Severson et al., 2002).

Se utilizó Driver para analizar la continuidad en los ensayos de ley de azufre, lo que generó una serie de elipsoides y discos planos estructurales que capturan la tendencia controlada por el contacto basal ondulado. Estos resultados se transfirieron a Leapfrog, donde se utilizaron para construir un volumen de dominio de estimación basado en la ley y un conjunto de superficies de interpolación de forma que capturan la tendencia local de la ley a lo largo del yacimiento. A continuación, estas superficies se transfirieron al estimador de orientación variable de Leapfrog Edge, donde se utilizaron para guiar una estimación de kriging ordinario de tipo LVA. La anisotropía de la ley se aplicó al reorientar de forma local el elipsoide de búsqueda y el variograma, lo que proporcionó una estimación refinada que muestra una mayor continuidad a lo largo de la superficie de contacto basal ondulada.

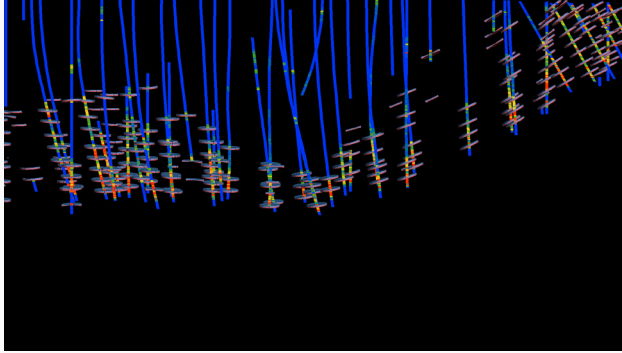
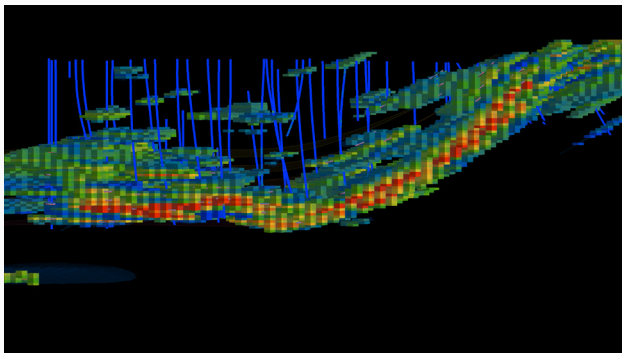
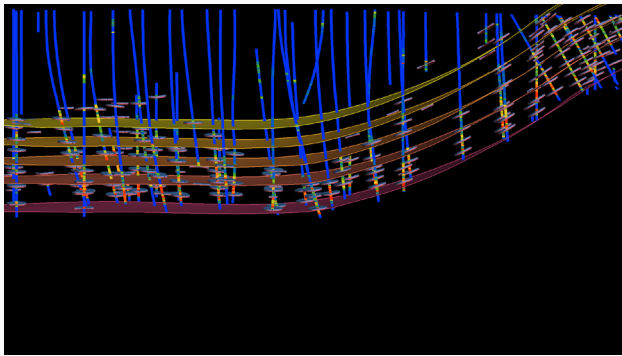


FIGURA 11: Estimación del contenido de azufre en el yacimiento de Babbitt según el método LVA. Las tendencias derivadas de los factores determinantes se utilizan como datos de entrada para los interpolantes de Leapfrog, los volúmenes de dominio basados en el grado y las estimaciones de orientación variable.



Conclusión

Driver representa un avance significativo en la forma en que se puede extraer y utilizar la información estructural en el modelado y la estimación geológicas. Al cuantificar de manera directa la continuidad geológica local a partir de los datos de perforación, genera información estructural significativa que respalda una amplia gama de flujos de trabajo, desde el análisis de datos exploratorios y la construcción de dominios hasta el descubrimiento, el modelado implícito y la estimación.

En todas estas aplicaciones, el valor es el mismo: Driver convierte la información estructural, que a menudo resulta difícil de capturar y aplicar, en resultados transparentes, auditables y útiles para el trabajo diario de modelado. Al facilitar la cuantificación de la interpretación estructural, así como su actualización y posterior uso, permite crear modelos más dinámicos, más conectados con los datos y mejor adaptados a la naturaleza local de la geología. Y lo que es igual de importante, lo hace sin excluir al geólogo del proceso. En un mercado cada vez más marcado por la automatización, Driver ofrece una vía que mantiene a los geólogos y su experiencia en el centro, al tiempo que les proporciona mejores herramientas para crear, probar y perfeccionar modelos con mayor rapidez, confianza y control.

Más información sobre Driver

Programe una demostración personalizada de Driver y descubra cómo se puede implementar Driver en su organización.

[Más información](#)

Referencias

Begbie, M. J., K. B. Spörli, y J. L. Mauk. 2007. "Structural Evolution of the Golden Cross Epithermal Au-Ag Deposit, New Zealand". *Economic Geology*.

Cowan, E. J. 2020. "Deposit-Scale Structural Architecture of the Sigma-Lamaque Gold Deposit, Canada: Insights from a Newly Proposed 3D Method for Assessing Structural Controls from Drill Hole Data". *Mineralium Deposita*.

Kentwell, D. J. 2019. "Destroying the Distinction Between Explicit and Implicit Geological Modelling".

Martin, R., D. Machuca-Mory, O. Leuangthong, y J. B. Boisvert. 2019. "Non-Stationary Geostatistical Modeling: A Case Study Comparing LVA Estimation Frameworks". *Natural Resources Research*.

Reid, R. J., y E. J. Cowan. 2023. "Towards Quantifying Uncertainties in Geological Models for Mineral Resource Estimation Through Outside-In Deposit-Scale Structural Geological Analysis". *Australian Journal of Earth Sciences*.

Severson, M. J., J. D. Miller, D. M. Peterson, J. C. Green, y S. A. Hauck. 2002. "Mineral Potential of the Duluth Complex and Related Intrusions". *Minnesota Geological Survey Report of Investigations* 58: 164–200.

Sinclair, A. J., y G. H. Blackwell. 2002. *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge: Cambridge University Press.

Sinclair, A. J., y M. Vallée. 1994. "Reviewing Continuity: An Essential Element of Quality Control for Deposit and Reserve Estimation". *Exploration and Mining Geology*: 95–108.

Stoch, B., J. Basson, J. N. Gloyne-Jones, y K. G. Lomberg. 2022. "The Influence of Variable Anisotropic Search Parameters on Implicitly-Modelled Volumes and Estimated Contained Metal in a Structurally Complex Gold Deposit". *Ore Geology Reviews*.

Comprenda el subsuelo para construir un mundo mejor.

En Seequent, estamos transformando la manera en que trabajan las empresas a través de una mayor comprensión del subsuelo.

Como líderes mundiales en software colaborativo de modelado, análisis y gestión de datos del subsuelo, en Seequent, estamos a la vanguardia en la creación de un conocimiento colectivo sobre la Tierra.

Contratamos personas maravillosas que colaboran con nuestros clientes en la búsqueda de soluciones tecnológicas ante sus desafíos, capaces de generar resultados más positivos para lograr un mundo mejor.

Seequent, The Bentley Subsurface Company, conecta nuestro entorno natural con el mundo de la construcción para que las empresas puedan gestionar el impacto de sus proyectos en cada etapa.

Seequent: Comprenda el subsuelo.