

Datos del subsuelo y su conocimiento para las Ciudades del Mañana: lecciones aprendidas de Glasgow y su aplicabilidad en otros lugares

Diarmad CAMPBELL (1) & Helen BONSOR (1) & David LAWRENCE (1) & Alison MONAGHAN (1) & Katie WHITBREAD (1) & Tim KEARSEY (1) & Andrew FINLAYSON (1) & David ENTWISLE (1) & Andrew KINGDON (1) & Stephanie BRICKER (1) & Fiona FORDYCE (1) & Hugh BARRON (1) & Gillian DICK (2) & David HAY (2)

(1) British Geological Survey & (2) City of Glasgow, United Kingdom.

RESUMEN: El conocimiento del subsuelo es de vital importancia en la planificación y ejecución exitosa de proyectos de construcción y regeneración urbanas. Para abordar en el área de Glasgow éste y otros temas del subsuelo urbano (por ejemplo, la planificación, las inundaciones, la contaminación), el proyecto Clyde-Urban Super-Project (CUSP) del Servicio Geológico Británico (BGS, por sus siglas en inglés) ha desarrollado modelos 3D y 4D del subsuelo. Asimismo, se han producido otros conjuntos de datos de geociencias (geoquímica, agua subterránea, geología de ingeniería).

Los modelos basados en información obtenida de decenas de miles de perforaciones y otras fuentes, proporcionan nuevos conocimientos sobre: la geología compleja de Glasgow, los impactos de su legado industrial, y las oportunidades para aprovechar el calor de las explotaciones mineras abandonadas.

Para que los modelos y datos del proyecto CUSP fueran más accesibles, el BGS y el Ayuntamiento de Glasgow, socio clave, han establecido una red para acceder al conocimiento del subsuelo (ASK, por sus siglas en inglés). Esta red permite el intercambio de datos y conocimientos, implicando a socios de los sectores público y privado. ASK promueve el libre flujo digital de datos del subsuelo y el conocimiento entre sus socios.

Las lecciones aprendidas en Glasgow se comparten a través de la Acción Europea COST (Sub-Urban), centrada en el uso sostenible del subsuelo urbano, y en la transformación de las relaciones entre los que desarrollan el conocimiento del subsuelo urbano y los que pueden beneficiarse más de él, los planificadores y promotores de las ciudades del futuro.

DESCRITORES: Subsuelo urbano. Ciudades. Glasgow. Reino Unido.

Recibido: 17.11.2014; Revisado: 03.09.2015.
Correo electrónico: djdl@bgs.ac.uk;
Gillian.dick@drs.glasgow.gov.uk
Artículo elaborado en el marco de la Acción COST Sub-Urban (TU1206), una red europea centrada en mejorar el conocimiento y el uso del subsuelo de las ciudades (www.sub-urban.eu).
Los autores quieren reconocer, el apoyo directo a esta iniciativa, al British Geological Survey, al Ayuntamiento de Glasgow

y a otros colegas que han participado en el proyecto CUSP, y a los que han contribuido por diversas vías al progreso de esta temática de investigación. Los autores también desean dar las gracias al profesor Rubén Camilo Lois González y a Miguel Pazos Otón por la traducción de este texto. Al Director Ejecutivo del British Geological Survey por autorizar la publicación de este artículo y los comentarios constructivos de los dos revisores anónimos son altamente apreciados.

1. Introducción

Glasgow, la ciudad más grande de Escocia, se construyó a lo largo de la parte baja del río Clyde (FIG. 1). La población de Glasgow y de la conurbación circundante es de aproximadamente 1,2 millones. En el pasado Glasgow era un centro importante de la industria y fue particularmente famosa por la construcción de barcos, la extensa explotación minera de carbón y siderurgia, y su ingeniería, acero, productos químicos, y otras industrias. Con el declive de las mismas, también decayeron la economía y la población. Sin embargo, ahora Glasgow está creciendo de nuevo, su economía se está adaptando a una nueva era, y la ciudad está experimentando un renacimiento.

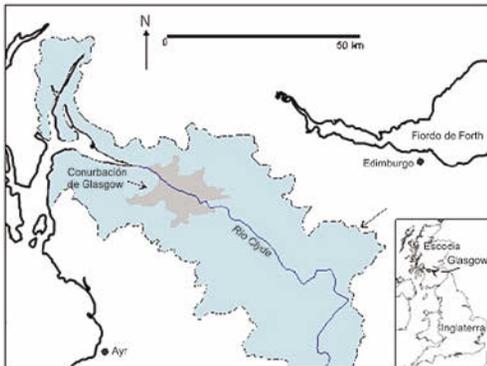


FIG. 1/ Localización de la conurbación de Glasgow dentro de la cuenca del río Clyde, en el oeste de Escocia, Reino Unido

Fuente: (COPYRIGHT TOPOGRAFIA CROWN. Todos los derechos reservados. BGS 100017897/2012).

En el corazón de la ciudad post-industrial de Glasgow se encuentran las áreas de Clyde Gateway y Clyde Waterfront, las que en conjunto forman una prioridad nacional de regeneración urbana para Escocia. Esta regeneración es un compromiso decenal del gobierno que tiene por objeto estimular el desarrollo sostenible y el crecimiento económico, impulsar proyectos comunitarios pequeños, y hacer frente a la privación concentrada resultante del declive industrial. El desafío para la regeneración de estas áreas es la necesidad de superar el legado de antiguas actividades industriales; incluyendo las huellas geoquímicas de los usos industriales de los suelos y las aguas subterráneas en el pasado, y las extensas explotaciones mineras abandonadas, algunas de las cuales están a poca profundidad.

La industria de la construcción en el Reino Unido y Europa reconoce generalmente que la insuficiente comprensión de las condiciones del suelo bajo la superficie es un factor clave en los gastos excesivos, los retrasos en los proyectos, y en el diseño excesivamente conservador (por ejemplo, CLAYTON, 2001; PARRY, 2009; BAYNES, 2010). La pérdida acumulada en la economía es sustancial. El avance en esta situación exige un mejor uso y re-empelo de los datos y del conocimiento que el realizado en la actualidad. Por tanto, para apoyar la regeneración de Glasgow y minimizar los problemas de construcción relacionados con lo conocido como «las condiciones del suelo no previstas», el Servicio Geológico Británico (BGS) ha emprendido un importante proyecto multidisciplinar, el Clyde-Urban Super-Project (CUSP), centrado en el subsuelo de Glasgow y sus alrededores.

El proyecto CUSP, iniciado en 2009, ha adoptado un enfoque integral de sistemas de geociencias (MERRITT & al., 2007; CAMPBELL & al., 2009, 2010). Se desarrollaron modelos dinámicos 3D de suelo poco profundos (tanto deterministas como estocásticos) para caracterizar los complejos depósitos superficiales, y el lecho de roca fallado que sustenta Glasgow. Los modelos son multi-escalares (alrededores y conurbación, área de desarrollo, corredor lineal, y sitio individual), y se trata de los más ambiciosos de alta resolución y de escala de conurbación de su tipo que han sido completados en el Reino Unido. Los mismos pueden ayudar a hacer frente a una serie de cuestiones geo-ambientales, por ejemplo: la identificación de las fuentes; las vías de migración y sumideros de contaminantes, como resultado de una multiplicidad de legados industriales; y los riesgos geológicos potenciales asociados con la antigua extracción generalizada de recursos naturales (especialmente carbón y siderurgia) en el entorno urbano. En combinación con otras bases de datos del proyecto CUSP, relacionadas con el agua subterránea, la geoquímica de suelos y aguas, la ingeniería geológica y las propiedades geotécnicas del subsuelo poco profundo, proporcionan también la base para una estrategia de geociencia para el subsuelo urbano en general. Por tanto, influirán en el proceso de toma de decisiones a través de aquellos que participan en la planificación, regulación y construcción de las áreas de regeneración.

Una prioridad clave del proyecto CUSP ha sido que la información relativa a la geociencia sea lo más accesible, relevante y comprensible posible para la amplia gama de usuarios que par-

ticipan en la regeneración y desarrollo sostenible de Glasgow. Por tanto, CUSP ha fomentado la integración multidisciplinar entre equipos de geocientíficos dentro del BGS, y la colaboración con socios externos con un amplio rango de perfiles (universidades, instituciones de investigación, autoridades locales y de regulación, consultores del sector privado, contratistas y promotores). El Ayuntamiento de Glasgow ha sido un socio estratégico clave del proyecto CUSP, ayudando a poner en práctica nuevos enfoques para la adquisición de datos (GSPEC), y establecer, con la BGS y otros, una red pionera de intercambio de conocimientos del subsuelo (ASK), para lograr unidad entre el BGS, los sectores público y privado, y la comunidad investigadora (BARRON, 2011; BONSOR & *al.*, 2013). De igual modo, los Servicios de Desarrollo y Regeneración del Ayuntamiento de Glasgow están desarrollando una Guía de Planificación Complementaria sobre el subsuelo de la urbe, como parte del próximo Plan de la Ciudad de Glasgow. Este documento será el primero de su tipo en el Reino Unido. El Ayuntamiento de Glasgow pretende que esta documentación sea compartida inicialmente con las autoridades locales vecinas, y posteriormente se extienda al resto del Reino Unido. La planificación relacionada con el subsuelo también está en proceso de elaboración, y las iniciativas relacionadas con el Modelado de Información de Construcción (BIM, por sus siglas en inglés) están en progreso en Glasgow. El modelado del subsuelo 3D de la ciudad procedente del BGS será una contribución importante para estos soportes claves, y su uso y traducción a otras formas de representación y formatos será apoyado por una Asociación de Intercambio de Conocimientos radicada en el BGS, y financiada por el Consejo de Investigación del Medio Ambiente Natural del Reino Unido (NERC, por sus siglas en inglés).

El proyecto CUSP ha presentado sus conclusiones en una conferencia que duró dos días celebrada en Glasgow en mayo de 2014. Sin embargo, CUSP continúa a través de una serie de intercambios de conocimiento y otras actividades vinculadas (ASK y GSPEC). En la actualidad, su relevancia para el uso sostenible del subsuelo urbano también se está promoviendo más ampliamente en el Reino Unido, y por la Acción Europea COST Sub-Urban (TU1206) (Campbell & *al.*, 2014) que cuenta con socios de toda Europa. La Acción «Sub-Urban» COST forma parte del Programa Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología (COST), y en particular, de su área Transporte y Desarrollo Urbano (ésta y otras acciones COST ahora forman parte del programa de in-

vestigación de la Unión Europea Horizonte 2020). La Acción Sub_Urban tiene como objetivo promover el intercambio de conocimientos sobre el subsuelo, y la planificación 3D del subsuelo urbano, como en el caso de Glasgow. El fin principal de la acción es fomentar un mayor reconocimiento por parte de los planificadores, promotores y responsables políticos sobre la importancia del subsuelo urbano. De este modo, se pretende mejorar la información que se aporta sobre este tema en el proceso de toma de decisiones, y como resultado lograr beneficios económicos, sociales y ambientales. De hecho, el ejemplo en progreso de Glasgow puede aportar un estímulo considerable.

2. Modelado 3D de los depósitos superficiales y del lecho de roca del subsuelo

El desarrollo de modelos geológicos 3D del subsuelo urbano está permitiendo un uso más eficaz de los datos de investigación del terreno, y ayudando a mejorar la comprensión de las condiciones subterráneas (CHOWDHURY & FLENTJE, 2007; ROYSE & *al.*, 2008; LELLIOTT & *al.*, 2009; CAMPBELL & *al.*, 2010; ALDISS & *al.*, 2012). En Europa, los estudios geológicos han sido líderes en el desarrollo de modelos geológicos 3D a escala regional y local, para apoyar la planificación urbana y el desarrollo sostenible (por ejemplo, BRIDGE & *al.*, 2004; BOURGINE & *al.*, 2009), las evaluaciones de riesgos de ingeniería (por ejemplo CULSHAW 2005; NEUMANN & *al.*, 2009), y la gestión de las aguas subterráneas (por ejemplo LELLIOTT & *al.*, 2006; CARNEIRO & CARVALHO, 2010; CAMPBELL & *al.*, 2010).

Los modelos 3D del subsuelo desarrollados para Glasgow (MERRITT & *al.*, 2007; CAMPBELL & *al.*, 2009, 2010) son posiblemente los más completos de su tipo en el Reino Unido, y están basados en decenas de miles de perforaciones codificadas y otros datos, especialmente de planes de minas abandonadas de carbón y hierro. Los depósitos superficiales y el lecho de roca han sido modelados por separado, utilizando un software diferente, y flujos de trabajo separados (CAMPBELL & *al.*, 2010).

Más de 100.000 calicatas y perforaciones se identificaron dentro de la conurbación de Glasgow, y los alrededores de la zona de influencia del Clyde. De ellos, más de 43.000 están disponibles en la Asociación de Especialistas Geotécnicos (AGS, por sus siglas en inglés),

en el formato digital estándar de la industria (AGGS, 2004); y más de 2,7 millones de datos están disponibles. Sin embargo, muchos otros datos sólo se disponían en formas analógicas y tuvieron que ser codificados digitalmente con el propósito de realizar el modelado 3D.

Los modelos que se han producido son predominantemente litoestratigráficos en estado natural, y como tales son comparables a los mapas geológicos del área publicados por la BGS (a escalas de 1:10.000, 1:50.000 y 1:250.000). La litoestratigrafía simplifica el modelo a través del envasado de los sedimentos presentes en la base de su litología, el nivel estratigráfico de la unidad y el proceso de deposición por el cual el depósito se ha creado. Esto en esencia nos dice cómo los sedimentos están espacialmente relacionados entre sí.

2.1. Modelos de depósitos superficiales

La interacción de los glaciares, los ríos y el mar en el pasado geológico «reciente» de Glasgow ha dejado complejas secuencias de depósitos superficiales que subyacen en la

ciudad. La secuencia geológica típica de los depósitos superficiales comprende depósitos glaciares más antiguos, principalmente arenas, siendo cubiertas por un depósito glaciar, que a su vez está cubierto por depósitos glaciofluviales, glaciales, glaciolacustres, glaciofluviales y terrazas marinas; tapados en la superficie por los depósitos hechos por el hombre. Esta secuencia de sedimentos varía en espesor en toda la zona de Glasgow, y localmente supera los 80 m. Los mapas geológicos 2D no son capaces de mostrar las variaciones complejas en la distribución y el espesor de estos depósitos. Sólo el modelado 3D puede alcanzar el nivel de detalle y la visualización necesarios, y proporcionar una capacidad de predicción en cuanto a la secuencia geológica en un lugar individual. Sin embargo, la variabilidad de estos depósitos plantea un desafío particular para el modelado 3D. Por tanto, los modelos 3D de los depósitos superficiales de Glasgow del proyecto CUSP (Fig. 2) abordaron esto utilizando inicialmente una metodología determinista (o interpretativa) y el software GSI3D para utilizar los datos geológicos disponibles.

Los modelos GSI3D han permitido visualizar la compleja naturaleza del subsuelo de la ciudad

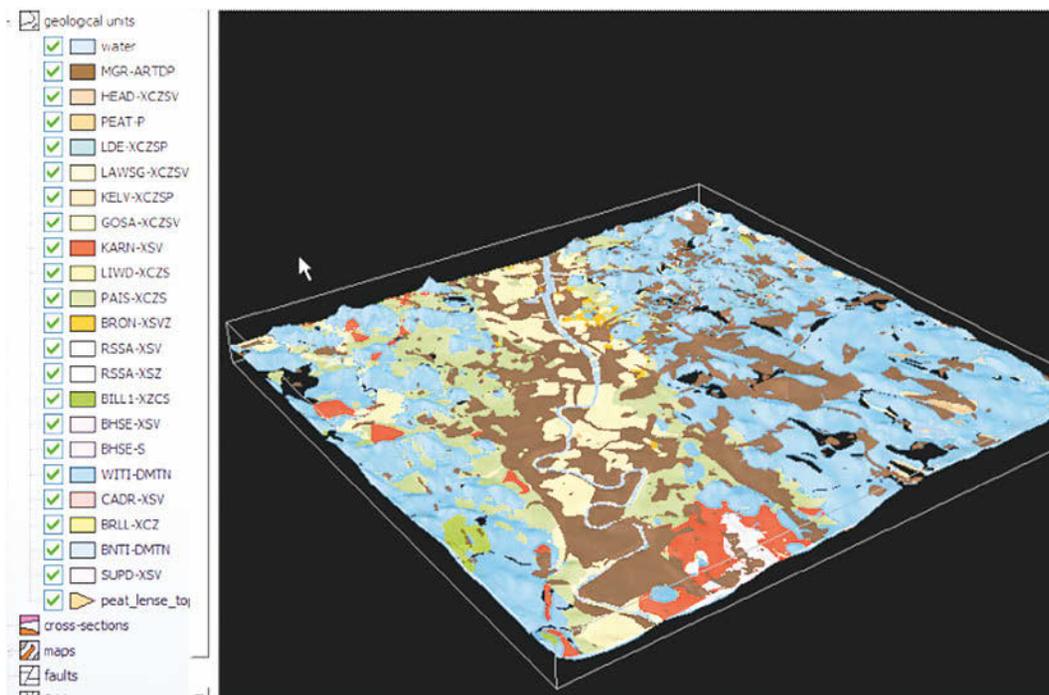


FIG. 2/ Vista general del modelo 3D de los depósitos superficiales bajo el Glasgow central (10 km por 10 km), mirando hacia el norte-oeste, y con una exageración vertical de 10 veces

Fuente: DE MONAGHAN & al., 2014.

desde los alrededores hasta la conurbación, el área de desarrollo y las escalas del sitio. Estos modelos revelan patrones regionales en las secuencias de los depósitos superficiales y, por tanto, en las condiciones del suelo que caracterizan a diferentes dominios geo-ambientales. A escala local, los modelos permiten que las relaciones espaciales entre las diferentes unidades geológicas sean deshechas, para permitir mejores predicciones de las condiciones del suelo en áreas de desarrollo potencial o de importancia para las evaluaciones de las aguas subterráneas.

Sin embargo, las unidades estratigráficas modeladas pueden ser altamente heterogéneas, por ejemplo, el Gourrock Sand Member no se compone en su totalidad de arena, sino de arena con un poco de limo, arcilla y gravas. Por lo tanto, también se han utilizado otras metodologías para representar la variabilidad de las propiedades del subsuelo. Las litologías de los depósitos superficiales en el centro de Glasgow, donde se dispone de abundantes datos del subsuelo poco profundo, se han modelado estocásticamente en una cuadrícula 3D (KINGDON & al., 2013; KEARSEY & al., 2014, 2015). El modelado estocástico aplica una función aleatoria para describir la variabilidad litológica. Las perforaciones pueden vincularse al modelado para ayudar a dar un resultado menos al azar, y que las propiedades físicas se extrapolen lo largo de esta red (FIG. 3). El BGS ha desarrollado un flujo de trabajo utilizando el software GOCAD para crear modelos estocásticos sólidos a escala de toda la ciudad. En el modelo de Glasgow se llevaron a cabo 500 simulaciones, y además de la litología, las propiedades modeladas incluyeron la densidad derivada de los datos de perforaciones de densidad geotécnica, una media litológica (derivada del cálculo punto por punto del modelo), y la conductividad hidráulica (derivada de la distribución del tamaño de partícula). Cada una de ellas ofrece diferentes retos estadísticos, pero proporciona un nuevo conocimiento sobre la variabilidad de las condiciones del suelo, ayudando así a la reurbanización. Por ejemplo, el procedimiento de densidad aparente permitió el estudio de las propiedades físicas en 3D de la superficie y del subsuelo, y destacó zonas de pobres condiciones de suelo. El modelado de los datos de conductividad hidráulica se utilizó para comprender las propiedades de flujo de los depósitos superficiales. Un mapa de la probabilidad de la conductividad del flujo en una parte de Glasgow ha descubierto zonas de baja escorrentía (baja conductividad) y alta escorrentía (alta conductividad). En este último caso, existe el peligro de un mayor flujo

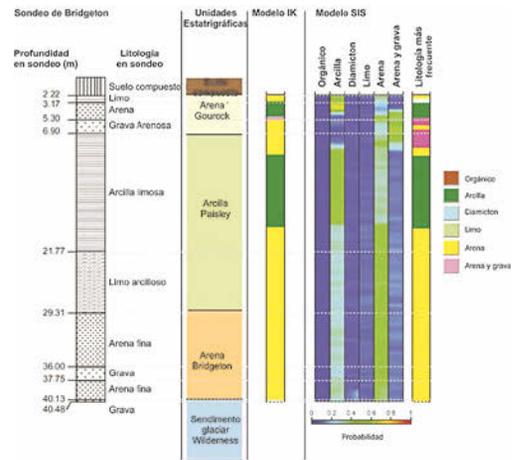


Fig. 3/ **Comparación de la secuencia geológica testada en la perforación de Bridgeton (en Glasgow) y las predicciones de los modelos estocásticos. La información de la perforación fue importada a GOCAD® con cada una de las seis categorías litológicas (orgánica, arcilla, arcilla diamictón, limo, arena, arena y grava) atribuidas como una propiedad discreta. Las litologías fueron estocásticamente modeladas (simuladas) a través de una malla utilizando tanto el Indicador de Kriging (IK) y métodos de Simulación Secuencial de Indicadores (SIS) (N.B. los suelos compuestos (hecho por el hombre) fueron excluidos de los modelos estocásticos)**

Fuente: DE KEARSEY & al., 2014.

de entrada que podría proporcionar vías potenciales para los contaminantes. Por tanto, el modelado 3D estocástico se puede utilizar, por ejemplo, para identificar los sitios contaminados con alta conductividad hidráulica, los que arriesgan la reactivación de contaminantes.

Si se dispone de datos suficientes, el modelado estocástico puede mejorar significativamente la comprensión del potencial de desarrollo del suelo urbano, y ayudar en la pre-planificación de investigaciones in situ (FIG. 3). Asimismo, proporciona información que no está disponible a partir de la cartografía tradicional o del modelado 3D determinista, y permite el desarrollo de modelos geológicos iterativos que pueden ser fácilmente actualizados en la medida que se disponga de nuevos datos.

2.1. Modelos de lecho de roca

Los modelos del lecho de roca del proyecto CUSP fueron desarrollados utilizando el software GOCAD. Las geometrías de falla del lecho de roca sedimentario de carbón del área de Glasgow, predominantemente carbonífero,

son muy complejas y con derrivos desde uno a cientos de metros. Sin embargo, un efecto secundario positivo de la minería y la industrialización de las áreas de yacimientos de carbón de la zona de influencia del Clyde es la disponibilidad de una amplia perforación del subsuelo y una base de datos del plan de mina. Esto fue utilizado por el BGS para producir 11 modelos de superficie de falla estratigráfica a partir de GOCAD que cubren toda la conurbación de Glasgow (FIGS. 4 y 5;). Estos abarcan modelos a escala local para la evaluación de riesgos, la planificación de infraestructuras y otros usos, así como modelos a escala regional para el potencial de recursos energéticos y la evolución tectónica. Además, se desarrollaron cinco modelos interpretativos GSI3D de los alrededores de Glasgow para definir las rocas de fondo volcánicas de las que hay pocos datos y las carboníferas más antiguas.

Los modelos han ayudado a los reguladores ambientales y a las autoridades locales a cumplir con los requisitos de la legislación medioambiental reciente, como la Directiva Marco del Agua de la UE. Ésta exige una comprensión 3D de la geometría y las propiedades de los principales acuíferos, además de proporcionar una herramienta para estudios teóricos de investigación *in situ* (CAMPBELL & al., 2010).

Conjuntamente con la investigación *in situ*, los modelos geológicos 3D también se han utilizado para evaluar el potencial termogeológico de las aguas en las minas abandonadas de carbón y la siderurgia que se encuentran por debajo de gran parte de la conurbación de Glasgow, y en particular de las áreas del este (CAMPBELL, 2010); y las secuencias de depósitos superficiales gruesos, para la extracción de calor y almacenamiento local. La principal técnica minera utilizada fue el método *short/long wall* que permitió a los techos colapsar después de la minería, reduciendo los huecos dejados por la explotación hasta un 90%. Sin embargo, las fracturas permanecen entre y por encima de las uniones, debido al hundimiento de los estratos superpuestos en los huecos. Los espacios con huecos son predecibles, y con la ayuda de los planes de mina y el modelado 3D, son potencialmente accesibles. Los huecos también han aumentado muy sustancialmente la permeabilidad. En términos de potencial térmico, las minas en Glasgow se trabajaron a profundidades de hasta 400 metros. Las estimaciones sugieren que hasta un 40% de las necesidades de calefacción de Glasgow podrían cumplirse por 100 años a partir del calor de las aguas de minas (CAMPBELL, 2010).

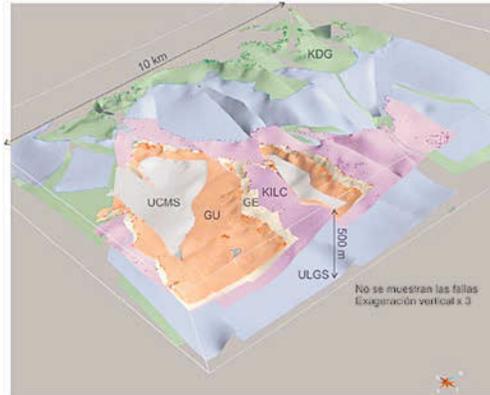


FIG. 4/ Vista general del modelado 3D de las superficies de lecho de roca bajo el Glasgow central (10 km por 10 km) con puntos de datos de perforación, los planes de la mina y se asigna afloramiento. Los fallos no se muestran; exageración vertical de 3 veces

Fuente: DE MONAGHAN & al., 2014.

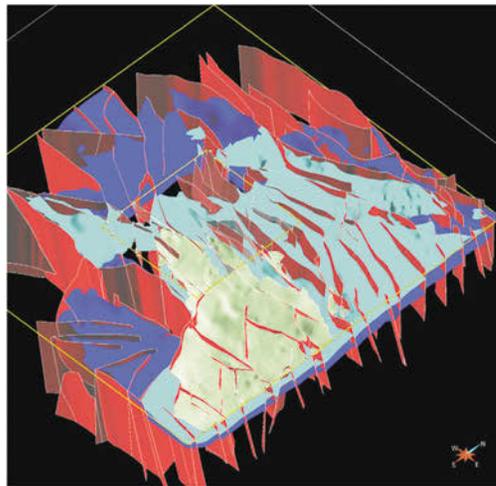


FIG. 5/ Imagen del modelo 3D del lecho de roca en falla bajo el Glasgow central (la plaza central se indica en amarillo, que es de 10 km por 10 km), el área urbana circundante y la cuenca del río Clyde, mirando hacia el norte-oeste, con una exageración vertical en tres veces. Los fallos se muestran en rojo, y las capas de carbón individuales se muestran en otros colores

Fuente: DE MONAGHAN & al., 2014.

3. SIG Geotécnicos

Las variaciones en la litología y en las características geotécnicas e hidrogeológicas han sido descritas como parte de una clasificación general de las unidades geológicas modeladas. Sin embargo, se ha desarrollado un SIG geotécnico (ENTWISLE & al., 2008). Esta es una

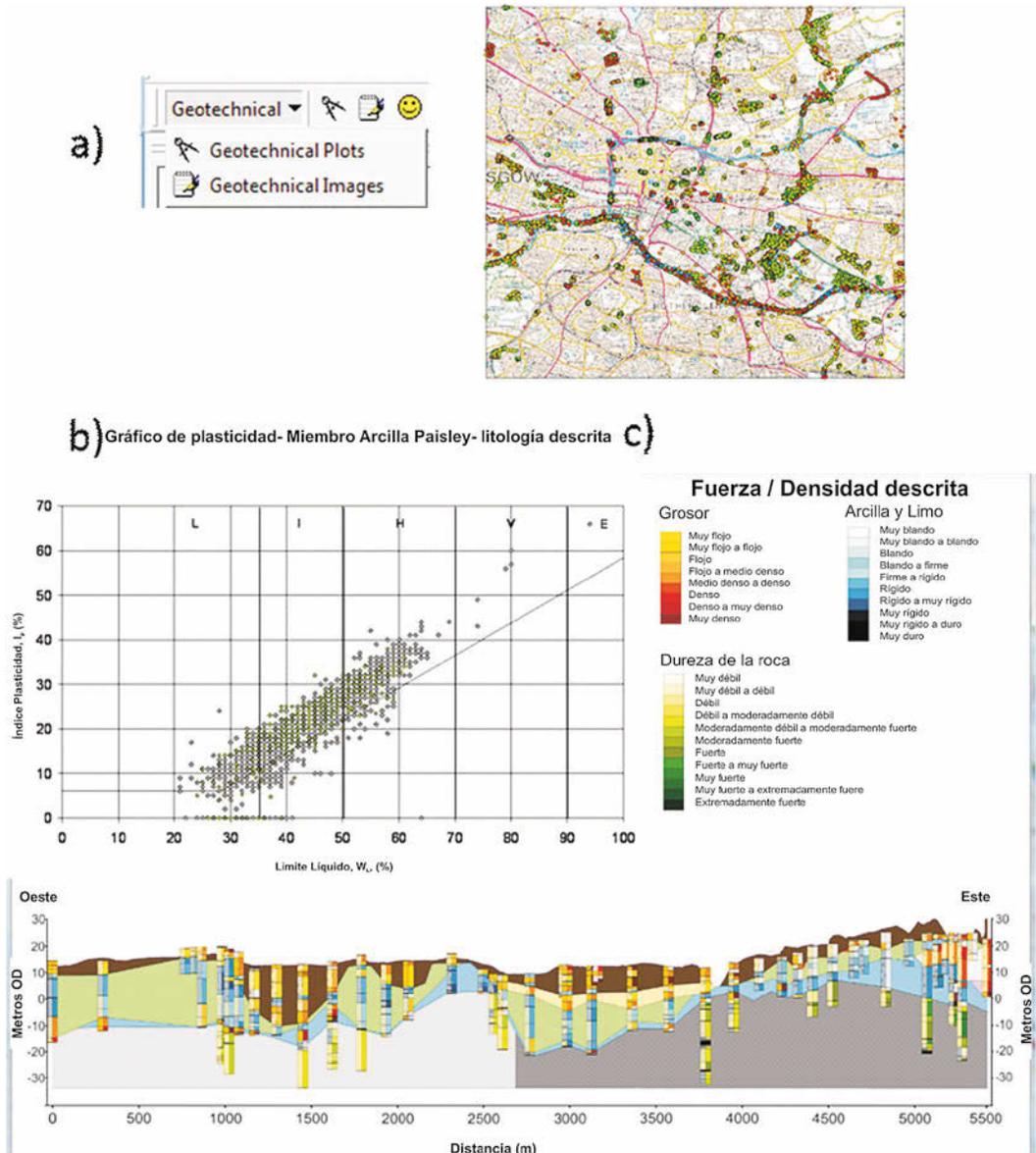


Fig. 6/ Presentación Ingeniería SIG de la información (gráficos pre-dibujados y secciones).
 a) el contenido del SIG y el mapa que ilustra la profundidad basal de perforaciones y hoyos (azules <10 m, verdes 10 a 30, amarillos y rojos de 30 a 80 m) (Topografía Crown Copyright Todos los derechos reservados BGS 100017897/2012); y herramientas escritas para SIG con dos opciones, aquí imágenes geotécnicas seleccionados para b) y c); b) Formulario para las opciones de gráficos, por ejemplo, selección de arcilla Paisley y trama Atterberg; c) Formulario de opciones gráficas, sección transversal 1 con litología y consistencia descrita, densidad o fuerza seleccionada y mostrada en las perforaciones

Fuente: elaboración propia a partir ENTWISLE & al., 2008.

herramienta teórica de estudio con la cual se pueden mostrar una amplia variedad de datos (FIG.6). La misma cubre la parte central de Glasgow, y proporciona un método simple de acceder, examinar y mostrar los datos geotécnicos disponibles.

La Base de Datos Nacional de Propiedades Geotécnicas, gestionada por el BGS, contiene información geotécnica relevante extraída de los registros de investigación in situ proporcionados por los clientes, consultores y contratistas, así como datos de campo y pruebas de laboratorio

realizadas por el Servicio Geológico Británico. Muchos de los datos se extrajeron de informes de investigación in situ de alta calidad, realizados para las principales carreteras y otros esquemas de construcción, incluyendo los datos de más de 100.000 perforaciones y calicatas.

Las tablas de bases de datos y los campos utilizados en el SIG geotécnico se basan en el formato digital actual estandarizado para la industria (versión 3.1) de la Asociación de Especialistas de Geotécnica y Geoambiente (AGGS, 2004). Siempre que sea preciso, se incluye información geológica adicional relacionada con la clasificación estratigráfica y las descripciones litológicas. La información que contiene la base de datos incluye: ubicaciones del Sistema de Coordenadas Británico; perforación, el núcleo y los datos de prueba in situ; datos de la muestra; y una serie de índices de laboratorio y datos de prueba de las propiedades mecánicas, tanto en suelos como en rocas. Los datos geotécnicos se muestran como una sección representativa geológica y geotécnica, así como en gráficos de resumen. Asimismo, también está disponible información relevante como la minería y la geología modelada. En resumen, las parcelas se pueden extraer para, por ejemplo, dar una idea de la variación de los datos (comparar la plasticidad versus el límite de líquido o construir un diagrama de caja y bigotes mostrando la resistencia a la compresión uniaxial para diferentes unidades).

4. Sondeos geoquímicos de referencia de Glasgow y la Cuenca del Clyde

4.1. Descripción general

La distribución de sustancias potencialmente nocivas en el medio ambiente ha sido una creciente preocupación de la vigente legislación de protección del medio ambiente. Dado su intenso legado industrial, la BGS lleva a cabo amplios sondeos en el área de Glasgow, para conocer el impacto sobre el medio ambiente de este patrimonio industrial y la contaminación relacionada. Estos sondeos estuvieron dirigidos a ayudar a la gestión/protección de la tierra y el agua, e incluyeron exploraciones de:

- Suelo rural y urbano, como parte de los Sondeos Geoquímicos de Referencia del Proyecto Ambiental (G-BASE) de la BGS, y
- Aguas de arroyos rurales y urbanos, y la calidad de los sedimentos en la Cuenca del Clyde, incluyendo la zona de influencia del

Clyde, la conurbación de Glasgow y el Estuario Interior del Clyde.

4.2. Suelos

Los suelos fueron recolectados a través de una barrena sobre la base de una cuadrícula sistemática, donde se recogieron 4 muestras por km² en las zonas urbanas, y 1 por 2 km² en las zonas rurales. Los suelos (recolectados a dos profundidades, la más superficial a 5-20 cm de profundidad) se analizaron mediante XRF, y se evaluó el pH y la pérdida por ignición (LOI, por sus siglas en inglés) como indicadores de materia orgánica.

Los resultados del estudio han mostrado que independientemente del material geológico matriz, las concentraciones de metales en los suelos urbanos (especialmente Ca, Cu, Pb, Sb, Sn) son generalmente hasta 2,5 veces mayores (valores medios) que en los suelos rurales. Este es un típico indicador de la contaminación antropogénica urbana. Los conjuntos de datos recientemente disponibles muestran los impactos de la urbanización y el legado post-industrial de la contaminación urbana/industrial en la calidad del medio ambiente en la conurbación de Glasgow, todavía evidentes 40 años después de su gran declive industrial (por ejemplo, Fordyce & al., 2012; Morrison & al., 2014).

Por ejemplo, Glasgow tiene las concentraciones de Cr más altas de todas las ciudades del Reino Unido. Las concentraciones de Cr son generalmente altas en los suelos artificiales en Glasgow (20% de las muestras de suelo excedieron los valores de referencia de Cr en el suelo) (FIG. 7). Tal es el caso de Ravenscraig y sus alrededores, sede de la mayor fábrica de acero en Europa hasta 1992, y del área de Rutherglen, que fue sede de las mayores obras de tratamiento de cromo en el mundo hasta la década de 1960. Del mismo modo, los valores de Pb son también elevados en antiguas zonas industriales y en el centro de la ciudad de Glasgow. Las altas concentraciones de plomo están relacionadas con el antiguo uso del mismo en la gasolina, en la combustión del carbón, y en la pintura (6% de los suelos urbanos en Glasgow excedieron los valores de referencia de Pb).

4.3. Sedimentos

Las bases de datos de sedimentos fluviales rurales (cada muestra recolectada por cada 1,5 km²), sedimentos fluviales urbanos (cada muestra recolectada por cada 1 km²) y los se-

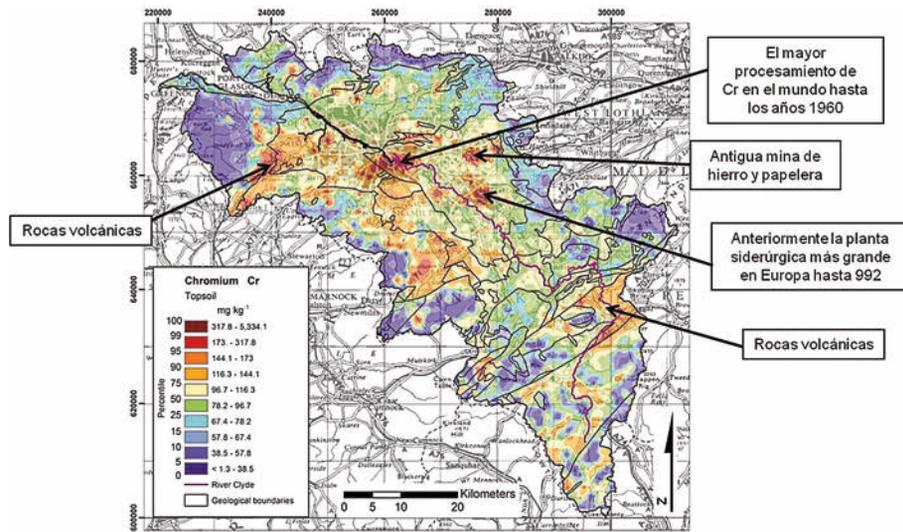


Fig. 7/ **Contenido de cromo (cerca de la superficie) en los suelos del área de Glasgow, y captación del Río Clyde, lo que refleja una combinación entre la geología (lecho de roca volcánica) y las influencias de la contaminación urbana (procesamiento de metales)**

Fuente: *FORDYCE & al., 2012 Topografía Crown Copyright. Todos los derechos reservados. BGS 100017897/2012).*

dimentos del estuario (recolectada a través del método de pala y núcleo) se integraron, permitiendo la producción de mapas de distribución de elementos para la totalidad de la Cuenca del Clyde (*LASS-EVANS & al., 2012*). Los mismos demuestran, por ejemplo, que las concentraciones de cobre y plomo en los sedimentos están fuertemente influidas por las zonas urbanas, con concentraciones elevadas (superiores a las directrices de calidad de sedimentos) extendiéndose desde Glasgow hasta el estuario del Clyde. Asimismo, se encontraron, tanto en Glasgow como en sus alrededores, factores de enriquecimiento para el plomo de hasta diez veces, y localmente hasta 45 (Fig. 8).

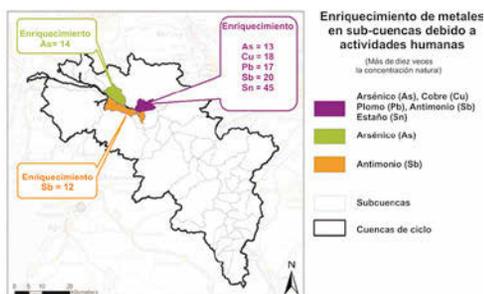


Fig. 8/ **Enriquecimientos metálicos (As, Cu, Pb, Sb, Sn) en sediments de los tributarios del río Clyde**

Fuente: *BRITISH GEOLOGICAL.*

4.4. Química del Agua

El mapeo de la química de la cuenca de drenaje del Clyde ha servido tanto para caracterizar la calidad del agua, como para evaluar el control dominante de calidad. Los muestreos realizados entre 2003 y 2010 generaron datos que abarcan aguas de arroyos, ríos y estuarios rurales y urbanos. El mapeo muestra la gran variabilidad espacial en la composición química a lo largo de la Cuenca y las distintas influencias de controles como la lluvia, la cobertura del suelo y la geología. Los mapas también muestran la química de la zona urbana en el contexto de la red de drenaje más amplia. Un atlas online y la base de datos de la química de agua superficial se encuentran en estado avanzado de preparación. Estos datos caracterizan la red de drenaje del Clyde y proporcionarán un nuevo recurso para las organizaciones interesadas.

4.5. Indicadores de calidad del suelo y salud/privación en Glasgow

El medio ambiente juega un papel importante en la moderación de la salud y el bienestar, pero las relaciones entre los factores ambientales y la salud y el bienestar son complejos,

con muchas interacciones. La exposición a factores de riesgo ambientales no se distribuye por igual, y los vínculos entre la mala salud y las desigualdades ambientales (por ejemplo, vivienda de baja calidad, delincuencia y emisiones industriales) forman parte de la Agenda de Justicia Ambiental.

Hay un legado histórico de contaminación en los suelos de Glasgow por elementos trazas potencialmente dañinos (por ejemplo, Cr, Pb). Por tanto, a lo largo de la ciudad se han evaluado las asociaciones espaciales entre la composición del suelo de metal, la contaminación del aire (NO₂/PM₁₀), la privación y la salud (casos respiratorios y la incidencia de cáncer de pulmón). Además, se aplicó el Método de Bioaccesibilidad Unificado, que imita el ambiente químico del sistema gastrointestinal humano, a 27 de las muestras de suelo del proyecto G-BASE de la BGS, incluyendo varias con Cr (VI) en minerales secundarios, derivados de los residuos del procesamiento del mineral cromita.

- i) El Cr bioaccesible oral fue mayor en los suelos afectados por COPR, pero el Cr (VI) fue reducido a Cr (III) durante la ingestión.
- ii) El Pb bioaccesible, en promedio, alrededor del 50% del total de Pb del suelo, estuvo más estrechamente relacionado con el total de Pb del suelo que con la fuente original, según lo revelado por las mediciones isotópicas (por ejemplo 206Pb/207Pb).

Contaminación Estuaria y Marina en el área de influencia del Clyde:

Los estuarios son hábitats importantes para peces, mariscos, aves y mamíferos, pero también son sumideros de sedimentos y contaminantes de las actividades urbanas, industriales y las recreativas contracorriente, a lo largo de la costa y en la zona costera adyacente. Ha habido relativamente pocos estudios detallados de contaminación de los sedimentos de los estuarios en todo el Reino Unido. El estudio del estuario del Clyde, llevado a cabo conjuntamente con el Ayuntamiento de Glasgow y la Agencia Escocesa de Protección del Medio (SEPA, por sus siglas en inglés), ha mostrado la extensión dentro del área de diferentes contaminantes potenciales en los sedimentos y su distribución según la profundidad. A partir de este último, se ha deducido una historia de contaminación, especialmente usando contaminantes orgánicos, isótopos de plomo y radionúclidos.

5. Aguas subterráneas

5.1. Agua Subterránea Urbana: una Red Piloto de seguimiento para Glasgow

Las aguas subterráneas urbanas representan ambientes variados que son modificados por la influencia humana. En el Reino Unido se necesita una mejor comprensión de estos sistemas para apoyar una regeneración urbana y un desarrollo sostenible, particularmente en relación con un uso incrementado de los Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS, por sus siglas en inglés); la vulnerabilidad de las aguas subterráneas; y la comprensión del papel de las aguas subterráneas en las inundaciones.

Glasgow, al igual que la mayoría de las ciudades en el Reino Unido, no tenía un sistema de monitoreo sistemático de aguas subterráneas antes del comienzo del proyecto CUSP, y había poca abstracción activa de las aguas subterráneas. En ausencia de datos de seguimiento sistemático, se utilizaron los datos de investigaciones in situ de terceros, para un estudio piloto dirigido a diseñar una red de monitoreo piloto para Glasgow. Este estudio fue posible a pesar de la desigual distribución y la agrupación de los 300 pozos de monitoreo, a partir de los cuales se recopilaron los datos de las aguas subterráneas (para los principales proyectos de carreteras y construcción), por la corta duración del monitoreo, y la calidad variable de los datos. Más de la mitad de los pozos tenían una altura inicial desconocida, y en casi todos los casos también era desconocida la unidad geológica del pozo que se estaba monitoreando. A pesar de la incertidumbre en una gran parte de los datos, el BGS desarrolló un modelo hidrogeológico conceptual y vinculó el modelo geológico 3D de Glasgow con la investigación in situ, para obtener una mejor comprensión del comportamiento del sistema de agua subterránea para el estudio piloto. Éste demostró el valor de los datos de investigación existentes del suelo, pero igualmente destacó la necesidad de recopilación y gestión de datos estandarizados.

En colaboración con el Ayuntamiento de Glasgow y la SEPA, los resultados de la red piloto se han utilizado para desarrollar una estrategia a largo plazo para el monitoreo de las aguas subterráneas dentro de la ciudad. En 2012 se estableció una red piloto de monitoreo con la ayuda del Ayuntamiento de Glasgow. Se pre-

tende que la red sea de bajo costo y que contenga contadores de datos instalados en pozos seleccionados que fueron perforados para otros fines, pero que sean adaptados para la red. El nivel de las aguas subterráneas, la temperatura y la conductividad son monitoreados en dos unidades geológicas claves (Gourock Sand y Paisley Clay).

A más largo plazo, se espera que la SEPA asuma el control de la red de monitoreo, con el fin de extender y ampliar la vigilancia a lo largo de la conurbación de Glasgow. Para mantener la filosofía de bajo costo de desarrollo de la red, cuando se planifiquen nuevas investigaciones in situ, la SEPA preguntará a los contratistas si las perforaciones planificadas son adecuadas para el monitoreo, y si se pueden ser utilizadas para ese propósito.

5.2. La modelización de aguas subterráneas para mejorar la comprensión conceptual del flujo bajo Glasgow

Con el desarrollo del modelo geológico 3D de la conurbación de Glasgow se mejoró la comprensión de los complejos depósitos cuaternarios del subsuelo, permitiendo una conceptualización detallada del régimen de flujo de agua subterránea. El modelo conceptual asume que estos depósitos no forman un acuífero continuo, y hay incertidumbre acerca de si el lecho de roca por debajo transmite las aguas subterráneas a los puntos de descarga superficiales. Para poner a prueba estas hipótesis se ha utilizado un modelo numérico simple de flujo de agua subterránea. Para mejorar la robustez del modelo es necesario recopilar más datos a nivel freático, en particular fuera el centro de Glasgow.

6. La Red ASK de Intercambio de Conocimientos para Glasgow y otros sitios

La comprensión insuficiente de las condiciones del subsuelo limita de forma significativa el desarrollo eficaz y sostenible de las zonas urbanas. Sin embargo, la dificultad de extracción de datos de los informes de investigación in situ implica la reutilización de datos de estudios teóricos, con información que a menudo no se vuelve a utilizar (THREADGOLD & HUTCHISON, 1992; GRIFFITHS & STOKES, 2008; LELLIOT & al., 2009).

6.1. La red ASK

La colaboración entre el Servicio Geológico Británico, el Ayuntamiento de Glasgow y consultores de Grontmij Ltd permitió la identificación del potencial para un cambio radical en la forma en que se informan los datos del subsuelo en las zonas urbanas, así como su reutilización por los sectores público y privado. El objetivo es facilitar la disponibilidad de datos y su reutilización para bien general. Esto concuerda con los principios de la Directiva INSPIRE de la UE, que establece el enfoque «recoger una vez, y utilizar muchas veces»; y también almacenar datos donde se puedan mantener más eficazmente, y sean fáciles de encontrar para ser reutilizados con más eficacia. Las condiciones requeridas para efectuar este cambio en Glasgow han sido explicadas (BARRON, 2011; BONSOR & al., 2013):

- i) El desarrollo de una red de intercambio de datos y conocimientos entre los sectores público y privado en Glasgow - ASK (Acceso al Conocimiento del Subsuelo);
- ii) La implementación de un formato de presentación de datos digitales estandarizado para mejorar la integridad y accesibilidad de los datos, y
- iii) El desarrollo de un repositorio de datos centralizado.

La combinación de estos tres elementos está permitiendo el desarrollo y el intercambio de bases de datos sistemáticas y de alta calidad del subsuelo, entre los sectores público y privado en el área de Glasgow, las que pueden ser utilizadas y actualizadas para apoyar la toma de decisiones (FIG. 9). El Ayuntamiento de Glasgow ha llevado a cabo el liderazgo en este cambio, convirtiendo los datos del subsuelo en un requisito contractual, y una recomendación para el resto de los datos, que deberán ser presentados al Consejo en un formato digital estándar. Estos datos son transferidos y validados a través de un portal web a la BGS para su almacenamiento a largo plazo y su reutilización por todas las partes interesadas. El gobierno, las agencias nacionales, y los sectores público y privado han ofrecido un gran apoyo al trabajo.

La Red ASK tiene como objetivos:

- i) Desarrollar e intercambiar bases de datos sistemáticas y de alta calidad del subsuelo, así como métodos.
- ii) Facilitar la reutilización eficaz de los datos del subsuelo para mejorar la información aportada en la toma de decisiones, y la gestión de los recursos urbanos.



Fig. 9/ El círculo virtuoso de datos e intercambio de conocimientos

RED ASK (Acceso al conocimiento del Subsuelo), y provisión de acceso a los modelos del subsuelo BGS 3D.

- iii) Establecer un mecanismo de transferencia de datos a un repositorio centralizado para datos primarios del subsuelo en formatos estandarizados, que permitan maximizar la accesibilidad y la reutilización de los datos (GSPEC).
- iv) Facilitar el acceso al modelo 3D atribuido a la BGS y a las bases de datos de SIG relacionados.
- v) Permitir a los usuarios que puedan influir en los resultados de los modelos con vistas a mejorar la usabilidad.
- vi) Evaluar la expansión de la red ASK, y/o usarla como ejemplo para otras ciudades/áreas del Reino Unido.
- vii) Explorar la integración de los datos geotécnicos y los modelos 3D en el marco del Modelado de Información de Construcción (BIM).

La iniciativa ASK está actuando como un ejemplo para el cambio en la gestión y presentación de datos del subsuelo a través de usuarios del sector público y privado, tanto en el Reino Unido como fuera. Una segunda red ASK se establecerá a finales de 2015 en la ciudad de Cardiff.

6.2. GSPEC

En paralelo con la red ASK se ha desarrollado la Especificación de Glasgow para la Captura de Datos (GSPEC, por sus siglas en inglés) (BONSOR & al., 2013). Su objetivo es mejorar la accesibilidad y la reutilización de los datos de

estudio de suelos para los sectores público y privado en Glasgow.

Bajo la GSPEC, consultoras y contratistas están contractualmente obligados por las autoridades locales a presentar los datos del subsuelo en el formato digital de la AGS para informar sobre datos del subsuelo. Los datos se cargan y se transfieren a un repositorio centralizado dentro del BGS para tener un acceso efectivo a largo plazo. Un proceso de validación incorporado al servicio de este portal web asegura que todos los datos recibidos y almacenados por el BGS cumplan con el estándar de la AGS. Por tanto, la GSPEC es un medio de asegurar el cumplimiento de las normas existentes, y mejorar el uso de los formatos de presentación de los datos digitales.

Este cambio radical en los datos y el intercambio de conocimientos aumentarán en gran medida la accesibilidad, la integridad y la reutilización de los datos del subsuelo dentro de Glasgow, e incrementará significativamente la cantidad de datos disponibles para la ingeniería de suelo, y la supervisión y regulación de los recursos en el entorno urbano. La prueba experimental en Glasgow está cobrando una fuerza significativa. Consultoras importantes y organizaciones nacionales, como Grontmij y Scottish Water, comentan los beneficios generalizados en la adopción de la GSPEC y la presentación de datos del subsuelo en un formato digital estándar, y en el hecho de contar con un ciclo virtuoso de intercambio de datos y conocimientos a través de la red ASK, así como el acceso a los modelos del subsuelo 3D del BGS. El potencial para un amplio despliegue a escala nacional es significativo.

7. Acción COST TU1206 Sub_Urban: Una Red Europea para mejorar la comprensión y el uso del suelo debajo de nuestras ciudades

La urbanización y el uso sostenible del subsuelo son el centro de la Acción TU1206, Sub_Urban - Una red europea para mejorar la comprensión y el uso del suelo debajo de nuestras ciudades, del programa de Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología (COST). Dentro del área de Transporte y Desarrollo Urbano de COST, Sub_Urban ha establecido una red de Organizaciones de Servicios Geológicos y otros investigadores en casi 30 países, para reunir y evaluar de forma conjunta investigación geocientífica urbana presentada en

3D/4D, así como colaborar en la predicción y visualización, y en la experiencia práctica en la planificación del subsuelo urbano (CAMPBELL & al., 2014). El énfasis inicial se centra en las ciudades europeas, pero la ambición es global.

Las lecciones aprendidas en Glasgow se comparten a través de la Acción Sub-Urban que se centra en el uso sostenible del subsuelo urbano. Las cuestiones clave abordadas por los socios de la Acción COST (en más de 30 países y ciudades), son similares a las de Glasgow: la creación de un flujo libre digital y accesibilidad online de datos del subsuelo, a través de medios voluntarios, como en Glasgow, o impulsados por la legislación como con BRO en los Países Bajos; desarrollo de modelos urbanos multi-escalares 3D y 4D del subsuelo

urbano poco profundo para encapsular, compartir y visualizar el avance en el conocimiento del subsuelo urbano, y sus propiedades geológicas y geotécnicas (su ingeniería); aguas subterráneas en tiempo real, y monitoreo y modelado geotérmico; y planificación del subsuelo, preferentemente en 3D y volumétrica, y totalmente integrado con la planificación por encima del suelo.

Al alentar ejemplos nacionales de buenas prácticas, como en Glasgow, COST transformará las relaciones entre aquellos que desarrollan el conocimiento del subsuelo urbano (normalmente Organizaciones de Servicio Geológico), y los que pueden beneficiarse más de él, planificadores y promotores encargados de las ciudades del mañana.

8. Bibliografía

- ASSOCIATION OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL SPECIALISTS (AGGS). (2004): *Electronic Transfer of Geotechnical and Geoenvironmental Data (Edition 3.1)*. 58 pp.
- ALDISS, D. T. & M. G. BLACK & D. C. ENTWISLE & D. P. PAGE & R. L. TERRINGTON (2012): Benefits of a 3D geological model for major tunnelling works: an example from Farringdon, east-central London, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45: 405–414.
- BARRON, H. (2011): «Maximising the benefit of past investment : the subsurface agenda : a case study from Glasgow». [Lecture] En: *European Commission INSPIRE Conference, 2011, Edinburgh, UK, 27 June - 1 July 2011*: 1-17. British Geological Survey.
- BAYNES, F. J. (2010): «Sources of geotechnical risk», *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43: 321–331.
- BOURGINE, B. & S. Dominique & A. Marache & P. Thierry (2009): «Tools and methods for constructing 3D geological models in the urban environment: the case of Bordeaux. Engineering Geology of Tomorrow's Cities». En M. G. Culshaw & H. J. Reeves & I. Jefferson & T. W. Spink (eds.). *Engineering Geology*, Special Publication 22, CD paper number 72. Geological Society, Londres.
- BONSOR, H. C. & D. C. ENTWISLE & S. WATSON & K. LAWRIE & S. BRICKER & S. CAMPBELL & D. LAWRENCE & H. BARRON & I. HALL & B. E. O DOCHARTAIGH (2013): «Maximising past investment in subsurface data in urban areas for sustainable resource management: a pilot in Glasgow, UK». Technical note. *Ground Engineering*, 46 (2): 25-28.
- BRIDGE, D. HOUGH, E. KESSLER, H. LELLIOT, M. PRICE, S. J. & REEVES H. J. (2004): «Integrated modelling of geosciences information to support sustainable urban planning, greater Manchester areas, northwest England». En R. C. BERG & H. RUSSELL & L. H. THORLEIFSON (eds) *Extended abstracts of the 49th GACMAC annual meeting*: 16-19. Illinois State Geological Survey, Open File Series 2004-8, Three-dimensional Geologic Mapping for Groundwater Applications.
- CAMPBELL, D. (2010): «Future Energy». *Earthwise*, 26: 34-35.
- & J. MERRITT & A. MONAGHAN & M. MANSOUR & S. LOUGHLIN & A. HUGHES & B. O DOCHARTAIGH & F. FORDYCE & D. ENTWISLE (2009): «3D attributed geoscience models and related GIS datasets to assist urban regeneration and resolve environmental problems in and around the Glasgow conurbation, UK». En: *EUREGEO 2009: European congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems, Munich, Germany, 9-12 June 2009*: 41-46, Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- CAMPBELL, D. & J. MERRITT & B. O DOCHARTAIGH & M. MANSOUR & A. HUGHES & F. FORDYCE & D. ENTWISLE & A. MONAGHAN & S. LOUGHLIN (2010): 3D geological models and their hydrogeological applications: supporting urban development – a case study in Glasgow-Clyde, UK, *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 161: 251–262.
- CAMPBELL, D. & J. JOHANNES DE BEER & D. LAWRENCE & M. VAN DER MEULEN & S. MIELBY & D. HAY & R. SCANLON & I. VAN CAMPENHOUT & R. TAUGS & I. ERIKSSON & M. BACIC (2014): «Sub-Urban – Transforming relationships between geoscientists and urban decision-makers (COST Action TU1206)» *Proceedings of the ACUUS (Associated Centers for Urban Underground Space), Seoul, Republic of Korea, September: 24-26, 2014*.
- CARNEIRO, J. & J. M. CARVALHO (2010): «Groundwater modelling as an urban planning tool: issues raised by a small scale model», *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 43: 157-170.
- CHOWDHURY, R. & P. FLETNJE (2008): «Strategic approaches for management risk in geomechanics». *Proceedings, 12th IACMAG Conference, Goa, India, 1-6*.

- CLAYTON, C. R. I. (2001): «Managing geotechnical risk: time for change?». *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering* 149: 3-11.
- CULSHAW, M. G. (2005): «From concept towards reality: developing the attributed 3D geological model of the subsurface», *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38: 231-284.
- ENTWISLE, D. & G. WILDMAN & S. CAMPBELL & J. MERRITT & S. SELF. & A. MONAGHAN & H. REEVES (2008): «3D geological modelling and geotechnical GIS for planning and development : an example from Glasgow, UK». En: *European conference of the International Association for Engineering geology, Madrid, Spain: 15-20. Sept 2008*.
- FORDYCE, F. M. & B. E. O DOCHARTAIGH & S. MORRISON & E. M. SCOTT & J. G. FARMER & M. R. CAVE & A. BROADWAY (2012): «Environmental applications of urban soil quality data in Glasgow, Scotland, UK». En: *Abstracts of the 9th ISEG*. Aveiro, Portugal: 43-44. University of Aveiro.
- GRIFFITHS, J. S. & M. STOKES (2008): «Engineering geomorphological input to ground models: an approach based on Earth systems», *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41: 73-91.
- KEARSEY, T. & J. WILLIAMS & A. FINLAYSON & P. WILLIAMSON & M. DOBBS & B. MARCHANT & A. KINGDON & S. CAMPBELL (2014): «Lithostratigraphy does not always equal lithology: lessons learned in communicating uncertainty from stochastic modelling glacial and post glacial deposits in Glasgow U.K». [Poster] En: *EGU General Assembly 2014, Vienna, Austria, 28 Apr - 2*.
- (2015): «Testing the application and limitation of stochastic simulations to predict the lithology of glacial and fluvial deposits in Central Glasgow, UK». *Engineering Geology*, 187: 98-112. 10.1016/j.enggeo.2014.12.017.
- KINGDON, A. & J. D. O. WILLIAMS & J. P. WILLIAMSON & R. M. LARK & M. R. DOBBS & T. KEARSEY & A. FINLAYSON & S. D. G. CAMPBELL (2013): «Modelling shallow urban geology using reservoir modelling techniques: voxel-based lithology and physical properties of the greater Glasgow area». En: *EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria, 7-12 April 2013*. Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts.
- LASS-EVANS, S. & F. M. FORDYCE & N. BREWARD & D. G. JONES & T. R. LISTER (2012): «Sediment and water quality in the River Clyde post-industrial catchment, Glasgow, UK». En: *Abstracts of the 9th ISEG*. Aveiro, Portugal: 5-6. University of Aveiro.
- LELLIOT, M. R. & M. R. CAVE & G. P. WEALTHALL (2009): «A structured approach to the measurement of uncertainty in 3D geological models», *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42: 95-105.
- LELLIOT, M. R. & D. BRIDGE & H. KESSLER & S. PRICE & K. SEYMOUR (2006): «The application of 3D geological modelling to recharge assessments in an urban environment», *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 39: 293-302.
- MERRITT, J. E. & A. A. MONAGHAN & D. C. ENTWISLE & A. G. HUGHES & S. D. G. CAMPBELL & M. A. E. BROWNE (2007): «3D attributed models for addressing environmental and engineering geoscience problems in areas of urban regeneration : a case study in Glasgow, UK». *First Break*, 25: 79-84.
- MONAGHAM, A. A. & S. L. B. ARKLEY & K. WHITBREAD & M. MCCORMAC (2014): «Clyde superficial deposits and bedrock models released to the ASK Network 2014: a guide for users Version 3», *British Geological Survey Open Report*, OR/14/013, 35 pp.
- MORRISON, S. & F. M. FORDYCE & E. MARIAN SCOTT (2014): «An initial assessment of spatial relationships between respiratory cases, soil metal content, air quality and deprivation indicators in Glasgow, Scotland, UK: relevance to the environmental justice agenda». *Environmental Geochemistry and Health*, 36 (2): 319-332. 10.1007/s10653-013-9565-4
- NEUMANN, D. & G. SCHÖNBERG & G. STROBEL (2009): «3D-modelling of ground conditions for the engineering geology map of the city of Magdeburg. Engineering Geology of Tomorrow's Cities» M. G. CULSHAW & H. J. REEVES & JEFFERSON, I. & SPINK, T.W. (eds.) Engineering Geology Special Publication 22, CD paper number, 444: 7. Geological Society, Londres.
- PARRY, S. 2009: «Introduction to Engineering geology in geotechnical risk management», *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42: 443-444.
- ROYSE, K. R. & H. J. REEVES & A. GIBSON (2008): «The modelling and visualisation of digital geoscientific data as an aid to land-use planning in the urban environment, an example from the Thames Gateway». *Communicating Environmental Geoscience, Geological Society Special Publication*, 305: 89-106. Geological Society, Londres.
- THREADGOLD, L. & R. J. HUTCHISON (1992): «The Electronic Transfer of Geotechnical Data from Ground Investigations», *Colloque International Géotechnique et Informatique*: 749-756. Paris, Presse de l'Ecole National des Ponts et Chaussées.