

"Trabajando para la sociedad"

Análisis y optimización mediante RecMin y modelos ARIMA de un yacimiento de uranio a cielo abierto.

Iván Jares Salguero, Rubén Alcalde Martín, Isidro Diego Álvarez, César Castaño Fernández

*Empresa: Escuela de Minas, Energía y Materiales de Oviedo
Dirección: c/Independencia 13, 33001, Oviedo
Teléfono: +34 622 538 755
E-mail: ivan.jares@gmail.com*

Resumen – *El objetivo es aclarar la situación futura del uranio en el mercado de materias primas, para ello se emplearán modelos de predicción ARIMA, a través de los cuales se estimará el precio del uranio durante el próximo año. Mediante los datos obtenidos del modelo, se optimizará un yacimiento de uranio mediante el software RecMin empleando el algoritmo del Cono Flotante. Dicha optimización permitirá dilucidar la permeabilidad a los cambios de precio de un yacimiento salmantino y considerar la rentabilidad de éste.*

1. INTRODUCCIÓN

Comúnmente, con el fin de determinar la eventual viabilidad de un proyecto minero, se realizan las apreciaciones técnico-económicas en torno a un precio fijo de la materia extraída. Como consecuencias de estas asunciones, en ocasiones, se producen variaciones apreciables que comprometen la rentabilidad del proyecto extractivo. En la presente ponencia se pretende limitar la incertidumbre provocada por el precio de la mena a través de la observación de la evolución del precio del concentrado de uranio en un contexto de cierta volatilidad de precios e incertidumbre energética.

Así, se pretende determinar la viabilidad de un yacimiento de uranio situado en la provincia de Salamanca, prospectando, mediante el uso de métodos económétricos, si se espera algún tipo de variación significante del precio de uranio que afecte de forma relevante la viabilidad económica de una explotación minera optimizada con el software RecMin.

Asimismo, se evaluará la rentabilidad de la explotación en los casos más desfavorables del modelo económtrico empleado para observar la permeabilidad a fluctuaciones mercantiles de la explotación de uranio.

2. PROYECTO SALAMANCA

El proyecto Salamanca se trata de un proyecto minero cuyo promotor es la empresa Berkeley Energía, el cual, consiste principalmente en la explotación de 3 yacimientos filonianos de uranio en la provincia de Salamanca mediante métodos a cielo abierto. Dichos yacimientos son denominados: Retortillo, Zona 7 y Alameda. El yacimiento que ha sido modelizado y que se analiza a lo largo del presente documento es el denominado Zona 7, el cual, se sitúa en el municipio de Villavieja de Yeltes (Salamanca, España).

El yacimiento Zona 7 se trata de un yacimiento filionario de tipo *intragranitic*, y, a su vez, enmarcado en la categoría *in(meta)sediments monometallic* (Berkeley Energía España, 2016; Jares Salguero, 2022). La forma del yacimiento es muy alargada y sub-horizontal a la superficie como se puede observar en la Figura 1. Se trata de una mineralización de uranio en forma de uraninita y coffinita principalmente, no obstante, los filones y las brechas de los que se compone muestran una

"Trabajando para la sociedad"

cristalización compleja (Huertas et al., 2015). Asimismo, cuenta con un cuerpo mineralizado compuesto por filones, stockwork y zonas de mineralización diseminada en torno a juntas y fracturas (Berkeley Energía España, 2016).

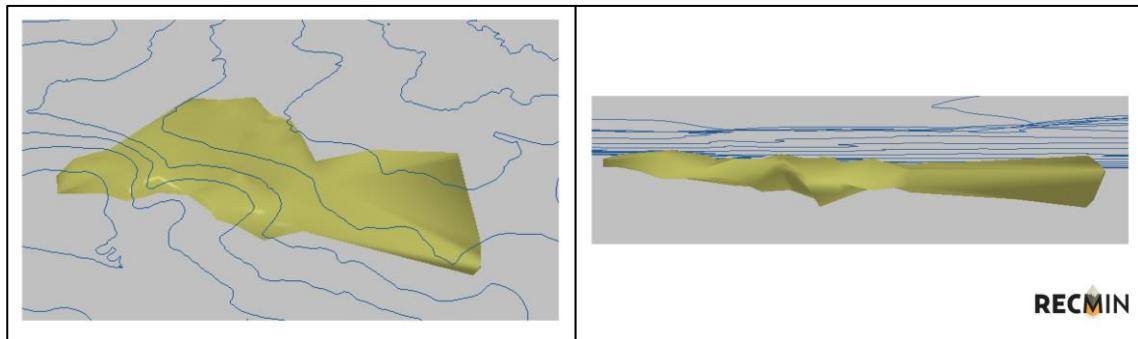


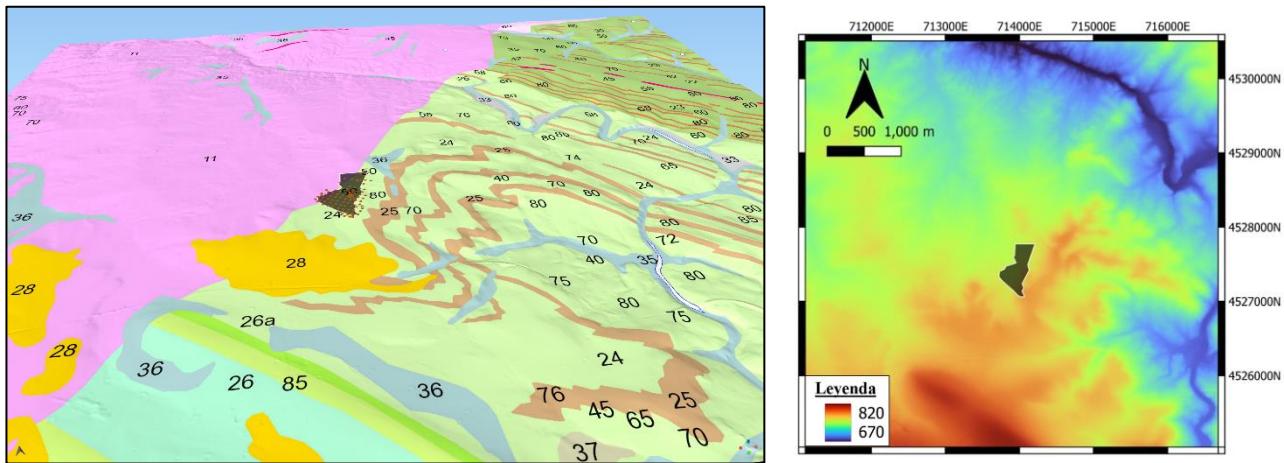
Figura 1. Mineralización Zona 7 en 3D (Jares Salguero, 2022)

3. ESTIMACIÓN DE RECURSOS

3.1. Topografía y geología

Para proceder a la estimación de recursos del yacimiento mediante el software RECMIN (Castañón Fernández, 2021), deben realizarse ciertas fases previas que corresponden a la creación de la topografía y la comprensión y caracterización de la geología regional. En el presente caso, dado que el conocimiento geológico, como consecuencia de la escasez de datos públicos disponibles, no es profundo, se ha realizado un estudio general.

En lo que respecta a la topografía, se ha desarrollado un modelo topográfico empleando un Sistema de Información Geográfica (GIS). Los datos han sido extraídos de los servicios del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN). Los resultados del análisis topográfico, empleando el sistema de coordenadas UTM, pueden observarse en la Figura 2.



"Trabajando para la sociedad"

- a) Granito Villavieja-Cipérez (11). Se trata de un granito porfídico de dos micas, de grano grueso a muy grueso, siendo habitual la aparición local de biotita en defecto de la moscovita. Se caracteriza por aflorar en forma de grandes bolos redondeados (Díez Montes and Gallastegui, 1992).
- b) Formación Aldeatejada (50). Se emplaza sobre la formación Monterrubio sin la existencia de contactos erosivos o abruptos entre ellas y de forma concordante. Ambas forman un conjunto litoestratigráfico denominado Grupo Valdelacasa de edad Cámbrico Inferior (Nozal y Robles, 1988). Está compuesta principalmente por pizarras y limolitas gris verdosas y negras, habitualmente masivas y en disposición sedimentológica horizontal, siendo los principales minerales presentes en la serie pizarrosa la moscovita, sericitita y el cuarzo (Arribas et al., 1982).

3.2. Datos de sondeos

Los datos de los sondeos con los que se ha contado para acometer la modelización haciendo uso del software RECMIN (Castañón Fernández, 2021), han sido extraídos del Technical Report Salamanca Projet (Berkeley Energía España, 2016) elaborado por la empresa Berkeley Energía. Se trata, por tanto, de un cálculo aproximado de validez teórica.

La Figura 2 muestra la situación de los sondeos con respecto al contorno del yacimiento obtenido. La mayoría de los sondeos se encuentran dispuestos en forma de malla de 50 x 50 metros, no obstante, existen zonas donde la información será más detallada (zona central) debido al aumento de la densidad de la malla de sondeos, mientras que, otras (zona norte) muestra menor continuidad exploratoria.

3.3. Modelo de bloques e interpolación

Tras la implementación de los datos topográficos y el estudio geológico, se ha desarrollado un modelo de bloques de dimensiones 15 x 15 x 10 m. Dicho modelo cubre todo el yacimiento y todos los sondeos, extendiéndose desde: X desde 713.550 E hasta 714.405 E, Y desde 4.526.875 N hasta 4.528.000 N y Z desde 625 hasta 775 m.

El estimador empleado para realizar la interpolación a partir de los datos de los sondeos es el inverso de una potencia de la distancia euclídea. En RECMIN (Castañón Fernández, 2021), se dispone de los métodos vecino más cercano, inverso de la distancia y kriging.

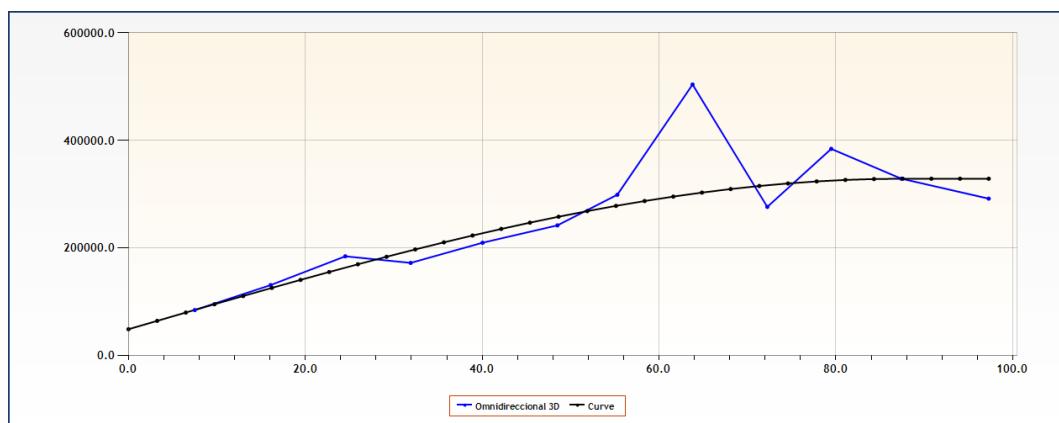


Figura 3. Variograma experimental omnidireccional del yacimiento (RecMin Variograms)

Se ha realizado la interpolación con una distancia máxima de influencia de 70 m tras el análisis del variograma experimental omnidireccional (Figura 3).

"Trabajando para la sociedad"

4. PRONÓSTICO DE PRECIOS DE URANIO

Se pretende analizar la influencia de la variación de precios del concentrado de uranio sobre la explotación del yacimiento Zona 7. Para ello, a través de los datos del precio del U_3O_8 de los últimos 10 años, se ha implementado un modelo ARIMA para pronosticar la posible evolución del precio del U_3O_8 , así como, analizar los intervalos de confianza de la estimación.

Actualmente, los modelos ARIMA (Modelo Autorregresivo Integrado de Media Móvil) son el tipo de modelos más ampliamente empleados para realizar pronósticos de series temporales que puedan guardar cierta estacionalidad a través de operaciones como la diferenciación o la aplicación de logaritmos (Mills and Markellos, 2008).

Identificar el modelo ARIMA apropiado normalmente requiere el desarrollo de 3 etapas comúnmente conocidas como metodología de Box-Jenkins (Box et al., 2015). Las etapas involucradas son las siguientes: identificación de un modelo en base a la información preliminar, estimación de parámetros y comprobación de la bondad del ajuste del modelo. El modelo ARIMA se creará empleando las librerías “*tseries*” y “*forecast*” a través del programa RStudio.

Los datos empleados para el pronóstico de precios de concentrado de uranio (U_3O_8) son los mostrados en la Figura 4. Se trata de la serie temporal de precios mensuales del periodo comprendido entre enero de 2013 y febrero de 2023 (Cameco, 2023, acceso 01/03/23).

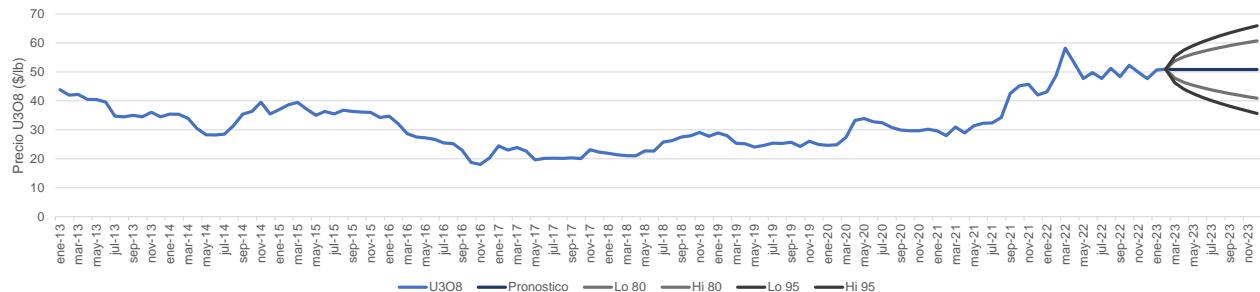


Figura 4. Histórico de precios de uranio (Cameco, 2023) y pronóstico del modelo ARIMA

En primer lugar, con el fin de obtener el modelo ARIMA que mejor pronostique los precios, se han aplicado diferencias a la serie temporal de precios de los últimos 10 años. Con esta primera operación, ya se ha obtenido una serie estacionaria, siendo además comprobada y validada con el test de Dickey-Fuller (Figura 5).

Empleando las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial y, tras haber obtenido la estacionariedad aplicando en una ocasión diferencias, pueden determinarse los parámetros de un modelo ARIMA, esto es, autorregresivos (AR_s), diferencias ($diffs$) y medias móviles (MA_s). Por tanto, si se define el modelo a través de dichos parámetros de la siguiente forma: ARIMA ($AR_s, diffs, MA_s$) y, empleando los gráficos expuestos en la Figura 6, se testará la bondad del ajuste del modelo ARIMA (0,1,2) mediante la prueba de Ljung-Box (Ljung and Box, 1978).

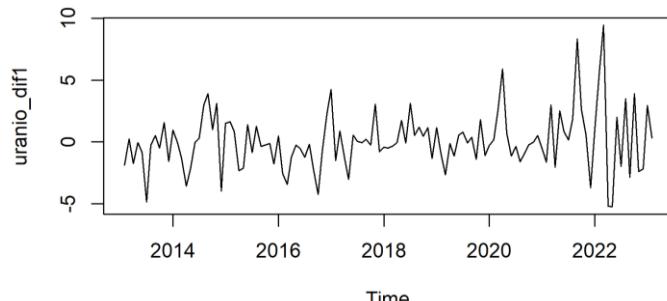


Figura 5. Transformada de la serie temporal aplicando diferencias

"Trabajando para la sociedad"

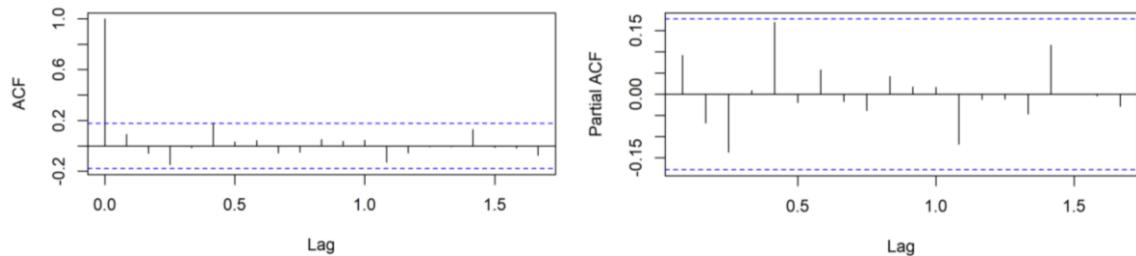


Figura 6. Función de autocorrelación (ACF) y función de autocorrelación parcial (PACF)

Para comprobar la veracidad del ajuste del modelo mediante la prueba de Ljung-Box, no sólo se comprobará el valor *p-value* arrojado, el cual deberá ser menor de 0,05, sino que, además, el valor *Q* de la prueba deberá ser superior a 0,05 (Kim et al., 2017). En este caso, como se indica en la Tabla 1, se valida el modelo ARIMA (0,1,2), procediéndose al análisis del yacimiento a través del pronóstico de éste.

Tabla 1. Estadísticos del modelo ARIMA

Tipo de Modelo	Parámetros del Modelo		Ljung-Box Test			Bondad del Ajuste
	Coeficientes		Q	DF	Sig.	
ARIMA (0,1,2)	Constante	5,434	110,89	1	0,9605	Aceptado
	MA Lag 1	0,0875				
	MA Lag 2	-0,0391				

5. OPTIMIZACIÓN DEL YACIMIENTO

Para la optimización del yacimiento, se ha utilizado el método del cono flotante implementado en el software RECMIN (Castañón Fernández, 2021). Se trata de un algoritmo sencillo y fácilmente auditabile, de uso muy extendido en el sector minero, especialmente en estudios iniciales como el realizado en este caso (Hustrulid et al., 2013).

Deben seleccionarse ciertos parámetros para la consecución del cálculo, tales como, la densidad de la roca, el ángulo de talud, los costes de minería y procesado, la recuperación metalúrgica y el precio de la materia prima.

- Densidad de la roca. Debido a la imposibilidad de realizar distinciones claras entre las formaciones geológicas y habida cuenta de la similitud entre los valores de las densidades, se ha seleccionado un valor medio de 2,8 t/m³.
- Ángulo de talud. Dado que se tratan de rocas competentes y no siendo una profundidad prominente, apoyándose en lo expuesto en el informe del promotor del proyecto (Berkeley Energía España, 2016), se selecciona una pendiente de talud de 52º.
- Costes de Minería. El coste de explotación estimado en el informe (Berkeley Energía España, 2016) para la corta Zona 7 es de 2,36 \$/t. Se ha seleccionado un coste de minería de 3 \$/t imponiendo una estructura de costes conservadora y adaptada a la variación interanual del índice de precios.
- Costes de preparación y concentración de menas. En el Technical Report Salamanca Projet (Berkeley Energía España, 2016), el procesado del mineral devengará un coste de 6,35 \$/t. Igualmente, se ha seleccionado un coste de 7 \$/t por razones análogas a las expuestas en los costes de minería.
- Recuperación metalúrgica. El método metalúrgico empleado es la lixiviación estática tipo *heap*. El rendimiento medio de la técnica se sitúa entre el 65 y el 85% (Álvarez, 1995), no obstante,

"Trabajando para la sociedad"

ciertos estudios limitan al 80% dicha recuperación (Ballester et al., 2000). En este caso, se ha calculado la recuperación metalúrgica con un 70% en virtud de las observaciones de (Hoummady, 2017; Petersen, 2016).

- f) Precio de concentrado de uranio (U_3O_8). Normalmente, se suele seleccionar un precio de concentrado de la materia explotada para el cálculo de la cota óptima, sin embargo, en el presente trabajo se tratará de observar la permeabilidad del yacimiento de uranio estudiado a los cambios que, previsiblemente, puedan acaecer en el mercado de uranio mundial. Para ello se ha realizado un pronóstico de precios ARIMA para el periodo febrero-diciembre de 2023.

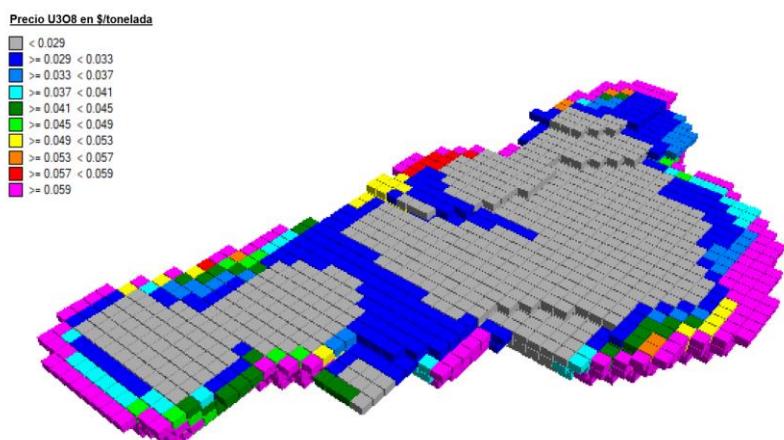


Figura 7. Optimización del yacimiento con diferentes precios de U_3O_8

Dado que no se ha fijado un precio de concentrado de uranio no es posible la obtención de una ley de corte. Para ello, se ha realizado un barrido con diferentes precios de U_3O_8 , obteniendo diferentes cortas encajadas, desde cortas pequeñas como consecuencia de un precio bajo, hasta cortas más grandes (Figura 7). Dicho barrido comprende los precios entre 15 y 110 \$/kg U_3O_8 (Opt. Min y Opt. Máx). En la Figura 7, como consecuencia de la escasa variación del yacimiento a partir de 59 \$/kg U_3O_8 , se exponen los bloques económicamente explotables si el U_3O_8 alcanzara un valor superior a 59 \$/kg. De forma análoga se emplea menos de 29 \$/kg U_3O_8 para mostrar la optimización.

Para analizar la viabilidad del yacimiento, se tomará como precio, el pronosticado por el intervalo de confianza inferior del 80 y 95% (Lo80 y Lo 95) y los precios empleados para la optimización de la Figura 7. Con ellos, se analiza el coste de explotación y procesado del concentrado extraído según los resultados de la optimización en RecMin (Figura 7). De esta forma, se puede calcular el OPEX de las labores y, seleccionando el CAPEX calculado por Berkeley Energía, actualizado con el índice Deflactor ($\approx 17\%$) desde el año 2016 al 2023, se puede obtener un resultado aproximado al final del periodo de explotación (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis económico del yacimiento

Precio (\$/lb U_3O_8)		Coste Explotación (M\$)	Coste Procesado (M\$)	U_3O_3 Rec (Mkg)	OPEX (M\$)	CAPEX (M\$)	Resultado (5 años) (M\$)
50,81	Pronóstico y Opt. Máx	82,56	95,47	7,16	609,22	70	539,22
40,91	Lo 80	79,64	94,72	7,12	466,60	70	396,60
35,67	Lo 95	77,64	93,62	7,08	395,51	70	325,51
7	Opt. Min	55,87	70,33	5,94	52,07	70	-17,93

"Trabajando para la sociedad"

6. SIMULACIÓN CONDICIONAL APLICANDO CONTROL DE LEYES

El control de leyes es el proceso que permite discriminar mera de estéril con precisión, mejorando el rendimiento de la operación minera, tanto mejorando el aprovechamiento del depósito como el rendimiento de la planta de concentración. Forma parte de la planificación a corto plazo de la explotación.

Los depósitos minerales muestran fuertes variaciones de ley, haciendo difícil su conocimiento. Los datos más detallados que se pueden conocer de forma previa a la explotación son los provenientes del análisis de los detritus de los barrenos de producción. A partir de dichos datos se puede interpolar en cada banco de trabajo (NN, vecino más cercano, IDW, inverso de la distancia, KR kriging) y así obtener una estimación de los tonelajes y leyes del material que se enviará a planta o a escombrera.

Se muestra en la Figura 8 un depósito mineral calculado mediante simulación condicional de las leyes del yacimiento utilizando las librerías R Geostats de Mines ParisTech con el método turning bands. A partir de dichos datos, si no se dispone todavía de los datos de los sondeos, se pueden obtener simulaciones de muestreo en la posición de cada barreno.

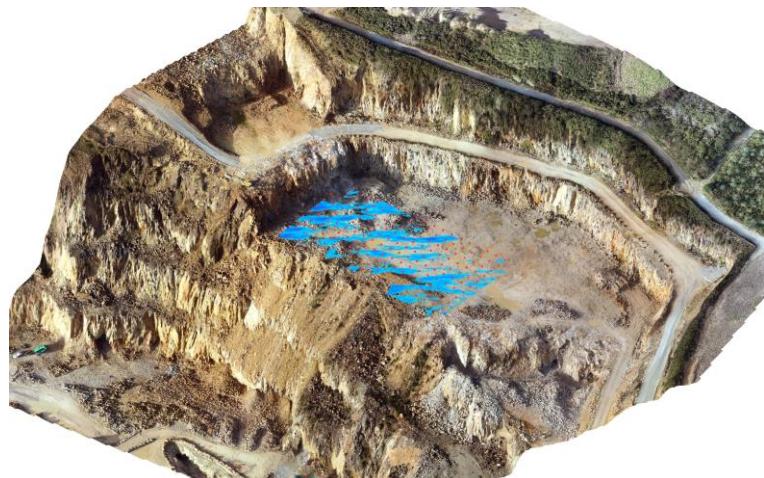


Figura 8. Simulación condicional aplicada a un banco en minería a cielo abierto. En rangos azules, leyes del yacimiento. Puntos rojos marcan posición de barrenos de producción.

La simulación estocástica se está utilizando cada vez más en la modelización de yacimientos (Paravarzar et al., 2015) El método de simulación condicional se podría utilizar también, ver (Dimitrakopoulos y Godoy, 2014), como método de interpolación en banco para definir el control de leyes.

7. CONCLUSIONES

Como se ha expuesto a lo largo de la presente ponencia, el precio del concentrado de uranio resulta muy estable con respecto al tiempo. Las variaciones sustanciales en su precio de mercado suelen provenir de factores externos, esto es, disquisiciones políticas, normativas o situaciones sobrevenidas.

Por su parte, la influencia de dicha estabilidad mercantil sobre el yacimiento objeto de estudio es notorio. El yacimiento, a pesar de ser optimizado con precios bajos del concentrado de uranio, los cuales se encuentran incluso en el extremo inferior del intervalo de confianza del 95%, redunda en un resultado económico satisfactorio al final del periodo de explotación. Por tanto, puede concluirse que el yacimiento, en un intervalo de confianza del 95% resulta viable económicamente. Queda para objeto de una investigación posterior la realización del mismo análisis variando el método de explotación, esto es, para el caso de una explotación subterránea.

"Trabajando para la sociedad"

REFERENCIAS

- Álvarez, M.C.Á., 1995. Yacimientos y obtención del uranio. Universidad de Oviedo.
- Arribas, A., Gonzalo Corral, F., Iglesias, M., 1982. Génesis de una mineralización asociada a una cúpula granítica: el yacimiento de estaño de Golpejas,(Salamanca).
- Ballester, A., Verdeja, L.F., Sancho, J., 2000. Metalurgia extractiva: fundamentos.
- Berkeley Energía España, 2016. Technical Report Salamanca Projet. Berkeley Energía España.
- Box, G.E., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., Ljung, G.M., 2015. Time series analysis: forecasting and control. John Wiley & Sons.
- Cameco, 2023. Uranium Price. URL <https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>
- Castañón Fernández, C., 2021. RECMIN & RECMIN PRO.
- Díez Montes, A., Gallastegui, G., 1992. Geología del plutón granítico de Ciperez-Garcirrey (Prov. Salamanca, España).
- Dimitrakopoulos, R., Godoy, M., 2014. Grade control based on economic ore/waste classification functions and stochastic simulations: examples, comparisons and applications. Min. Technol. 123, 90–106.
- Hoummady, E., 2017. Étude multi-échelle de l'agglomération pour la lixiviation en tas de minerais uranifères.
- Huertas, F.J., Gervilla, F., Gwatkin, C., 2015. Uranium mineralization in the Retortillo–Santidad Area (Salamanca, Spain): role of late alteration. Presented at the Mineral Deposit Research for a High-Tech World. Proceedings of the 12th Biennial SGA Meeting, pp. 1594–1597.
- Hustrulid, W.A., Kuchta, M., Martin, R.K., 2013. Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack. CRC Press.
- Jares Salguero, I., 2022. Modelización del yacimiento de uranio de Villavieja de Yeltes. Trab. Fin Grado.
- Julivert, M., Fontboté, J., Ribeiro, A., Conde, L., 1972. Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares: Madrid. Spain Inst. Geológico Min. Esp. Scale 1.
- Kim, S., Ko, W., Nam, H., Kim, C., Chung, Y., Bang, S., 2017. Statistical model for forecasting uranium prices to estimate the nuclear fuel cycle cost. Nucl. Eng. Technol. 49, 1063–1070. <https://doi.org/10.1016/j.net.2017.05.007>
- Ljung, G.M., Box, G.E.P., 1978. On a measure of lack of fit in time series models. Biometrika 65, 297–303. <https://doi.org/10.1093/biomet/65.2.297>
- Mills, T.C., Markellos, R.N., 2008. The econometric modelling of financial time series. Cambridge university press.
- Nozal, F., Robles, R., 1988. Series y correlación de las materiales anteordovícicos en los Montes de Toledo y el sur de Salamanca. Presented at the Congreso geológico de España. 2, pp. 139–143.
- Paravarzar, S., Emery, X., Madani, N., 2015. Comparing sequential Gaussian and turning bands algorithms for cosimulating grades in multi-element deposits. Comptes Rendus Geosci. 347, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.05.008>
- Petersen, J., 2016. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores—A brief overview. Hydrometallurgy 165, 206–212.