



**UNIVERSIDAD
DE BURGOS**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES E INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

**La inversión en minería de tierras
raras: evaluación económica
preliminar de proyectos mineros de
una materia prima crítica para la Unión
Europea**

Autora

María Victoria Riesgo García

Directores:

Dr. Miguel Ángel Manzanedo del Campo

Dra. Alicja Krzemień

Burgos, junio de 2020

AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES

La memoria titulada “La inversión en minería de tierras raras: evaluación económica preliminar de proyectos mineros de una materia prima crítica para la Unión Europea” que presenta Dña. María Victoria Riesgo García para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Burgos en el programa de doctorado en Tecnologías Industriales e Ingeniería Civil, ha sido realizada bajo la dirección del Dr. Miguel Ángel Manzanedo del Campo, del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Burgos, y la Dra. Alicja Krzemień, Department of Risk Assessment and Industrial Safety, Central Mining Institute, Katowice, Poland.

Burgos, junio de 2020

Los Directores



Dr. Miguel Ángel Manzanedo del Campo



Dra. Alicja Krzemień

El Doctorando



Dña. María Victoria Riesgo García



FORMATO DE LA TESIS

La presente tesis doctoral ha sido elaborada con el formato de compendio de artículos/publicaciones.

De entre las publicaciones que presentan los resultados obtenidos con esta tesis, se han seleccionado los siguientes artículos:

- Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Manzanedo del Campo, M. Á., Menéndez Álvarez, M., & Gent, M. R. (2017). **Rare earth elements mining investment: It is not all about China**. *Resources Policy* 53, 66–76.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.004>
- Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Manzanedo del Campo, M. Á., Escanciano García-Miranda, C., & Sánchez Lasheras, F. (2018). **Rare earth elements price forecasting by means of transgenic time series developed with ARIMA models**. *Resources Policy* 59, 95–102.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.06.003>
- Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Sáiz Bárcena, L. C., Diego Álvarez, I., & Castañón Fernández, C. (2019). **Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding on further project developments**. *Resources Policy* 64, 101525.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101525>

Todos ellos han sido publicados en la revista científica publicada por Elsevier, RESOURCES POLICY, del ámbito de la especialidad del trabajo desarrollado en la presente tesis e indexada en el *Journal Citation Report* del *Social Science Citation Reports*.

RESOURCES POLICY pertenece a la categoría de Environmental Studies del JCR. En 2017 tuvo un Impact Factor de 2,695, su Rango en la Categoría era 33 de 109 y su Cuartil era Q2. En 2018 tuvo un Impact Factor de 3,185, su Rango en la Categoría fue 30 de 116 y su Cuartil fue Q2. De momento esto también es aplicable para 2019.

De acuerdo con lo anterior y considerando la motivación y objetivos de esta tesis, el resto del presente documento queda estructurado como se expone a continuación:

- **Parte 1.** Introducción y Objetivos: En esta primera parte se presenta la motivación y objetivos generales de la tesis.
- **Parte 2.** Trabajos seleccionados: Esta segunda parte recoge los artículos más representativos publicados por el autor y directores de la tesis, listados anteriormente.
- **Parte 3.** Conclusiones: En la última parte se analizan los resultados de los artículos seleccionados, presentando las conclusiones finales, así como propuestas para el trabajo futuro de esta línea de investigación.

RESUMEN

China fue en el pasado la principal variable a la hora de analizar los precios de las tierras raras y su mercado, dado que comercializaban alrededor del 90% de los suministros mundiales. Durante 2010 y 2011 China redujo drásticamente sus exportaciones de tierras raras, por lo que los precios sufrieron subidas espectaculares. Como ejemplo se pueden mencionar los precios del óxido de disprosio que pasó de cotizar a 102,51 USD/kg en enero de 2009 a 2.150,00 USD/kg en enero de 2012. La reacción mundial a este hecho fue el desarrollo de un gran número de proyectos mineros de tierras raras fuera de China, muchos de los cuales fracasaron cuando los precios volvieron a caer.

En la actualidad y, debido a lo anteriormente expuesto, la industria de la minería de tierras raras presenta unos graves problemas sistémicos: falta de confianza de los inversores, opacidad del mercado y existencia mayoritaria de enfoques empresariales a corto plazo orientados hacia la obtención de beneficios rápidos.

La tesis doctoral que se presenta pretende dar solución a estos problemas a través de la realización de evaluaciones económicas preliminares desde un enfoque novedoso que, al mismo tiempo, se adecue los estándares existentes a nivel mundial para la realización de informes sobre resultados de exploración, recursos y reservas minerales: PERC Reporting Standard, JORC Code, SME Guide, SAMREC Code, NI-43 101, NAEN Code, etc.

Para ello se determinan, en primer lugar, los órdenes de magnitud tanto técnicos como económicos de esta industria minera, con el propósito de facilitar una herramienta de análisis a los inversores y, al mismo tiempo, facilitar el desarrollo de evaluaciones económicas preliminares de futuros proyectos mineros de inversión de tierras raras a las compañías mineras que desarrollan los mismos.

Esta labor se acomete a través del análisis en profundidad de cinco proyectos mineros de tierras raras en su fase preliminar: Nechalacho (Territorios del Noroeste, Canadá), Zandkopsdrift (Cabo Norte, Suráfrica), Bear Lodge (Wyoming, USA), Kvanefjeld (Sur de Groenlandia) y Dubbo Zirconia (Nueva Gales del Sur, Australia).

Para cada uno de estos proyectos se analizan las características más importantes de su proyecto minero-metalúrgico: mineral explotado, reservas o recursos disponibles, tipología y características de la explotación, duración, ratio de explotación, dilución, ratio de extracción, proceso mineralúrgico y metalúrgico, porcentajes de recuperación, inversión inicial, costes operativos, precios utilizados en las previsiones, tasas de descuento empleadas, resultados económico-financieros estimados, etc.

En base a todos los parámetros anteriores, se obtienen los órdenes de magnitud que permiten definir y tipificar la minería de tierras raras en la actualidad. Su comparación con las de cualquier proyecto que se analice, permitirá establecer la razonabilidad y bondad de sus estimaciones, así como contrastar que aquellas desviaciones existentes estén razonadas y fundamentadas convenientemente.



Dado que los precios de tierras raras utilizados en las previsiones económicas de estos proyectos se han demostrado como un auténtico talón de Aquiles, la segunda parte de la tesis doctoral se centra en el análisis de la variabilidad de dichos precios mediante el desarrollo de una teoría denominada “series temporales transgénicas”.

Esta teoría desarrolla una enzima de restricción para crear una serie temporal modificada genéticamente a partir de una representación de las series temporales que permite secuenciar su genoma. No existió la necesidad de desarrollar ADN ligasas dado que las series temporales pueden ser cortadas y pegadas sin mayores consideraciones.

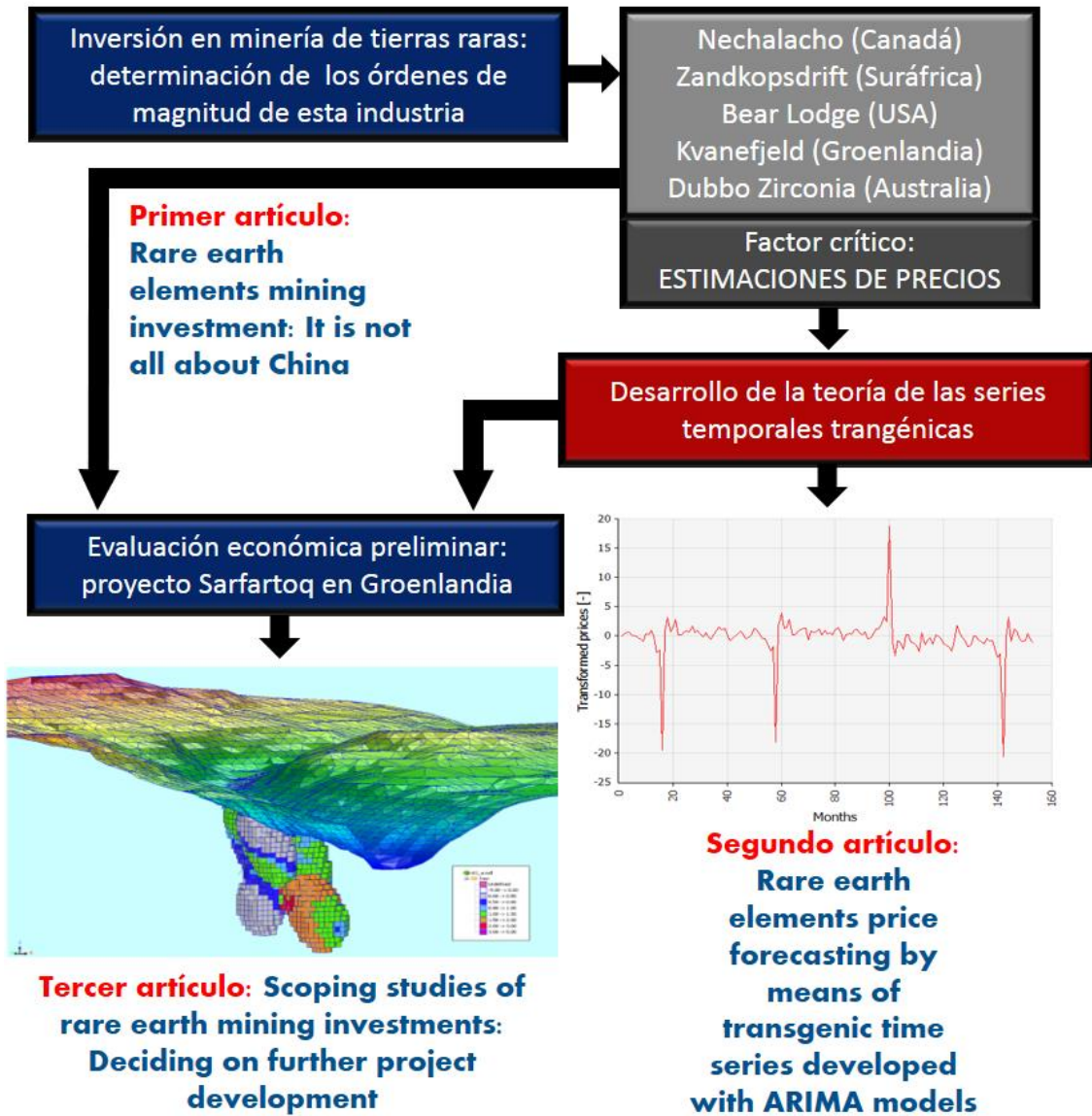
La aplicación de esta teoría permite obtener previsiones muchos más precisas en todos aquellos casos en que existen acontecimientos que provocan variaciones muy significativas en la evolución de las series temporales. Este fue el caso de las tierras raras ante el cierre de las exportaciones chinas.

Finalmente, y basándose en los órdenes de magnitud tanto técnicos como económicos de esta industria minera previamente estimados, se aborda la realización de la evaluación económica preliminar del proyecto Sarfartoq en Groenlandia.

A estos efectos, se utiliza única y exclusivamente información procedente de los sondeos realizados, de las características geológicas de área y de los análisis realizados sobre las muestras.

El análisis desarrollado permite demostrar que las evaluaciones económicas preliminares realizadas en base a información obtenida de otros proyectos de inversión en minería de tierras raras alrededor del mundo, permiten la adopción de decisiones estratégicas rápidas y seguras, lo que es crucial para las compañías mineras y, de forma especial, para las denominadas “junior mining companies”.

RESUMEN GRÁFICO





ÍNDICE

FORMATO DE LA TESIS	II
RESUMEN	III
RESUMEN GRÁFICO	V
ÍNDICE.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1.- Introducción	9
1.2.- Objetivos.....	12
1.3.- Metodología.....	13
1.4.- Medios y recursos materiales.....	14
2.- ARTÍCULOS SELECCIONADOS.....	15
2.1.- “Rare earth elements mining investment: It is not all about China”	15
References.....	16
2.2.- “Rare earth elements price forecasting by means of transgenic time series developed with ARIMA models”	21
References.....	22
2.3.- “Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding on further project developments”	27
References.....	28
3.- CONCLUSIONES	33
4.- BIBLIOGRAFÍA.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.- Introducción	9
1.2.- Objetivos	12
1.3.- Metodología	13
1.4.- Medios y recursos materiales	14
2.1.- “Rare earth elements mining investment: It is not all about China”	15
2.2.- “Rare earth elements price forecasting by means of transgenic time series developed with ARIMA models”	21
2.3.- “Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding on further project developments”	27



ÍNDICE DE TABLAS

1.1.- Introducción	9
1.2.- Objetivos	12
1.3.- Metodología	13
1.4.- Medios y recursos materiales	14
2.1.- “Rare earth elements mining investment: It is not all about China”	15
2.2.- “Rare earth elements price forecasting by means of transgenic time series developed with ARIMA models”	21
2.3.- “Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding on further project developments”	27

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- Introducción

La línea común a los tres artículos publicados con relación al presente documento es la minería de las tierras raras, un conjunto de minerales estratégicos y de gran valor económico mundial dadas sus numerosas aplicaciones prácticas (tecnologías civiles y militares, turbinas eólicas, sistemas avanzados de baterías, etc.). La problemática principal de este conjunto de tierras es la escasez de yacimientos económicamente rentables para ser explotados.

Existen quince elementos llamados tierras raras pertenecientes al grupo de los lantánidos, que generalmente se clasifican en tierras raras ligeras y tierras raras pesadas en función de su peso atómico. Dentro del grupo de tierras raras ligeras encontramos: lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), prometio (Pm) y samario (Sm). Por otro lado, las tierras raras pesadas son: europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb) y lutecio (Lu).

Cabe destacar que, tanto el escandio (Sc) como el itrio (Y), aunque no son verdaderas tierras raras, suelen clasificarse como tales debido a que poseen propiedades químicas y físicas similares, además de que suelen encontrarse en los mismos yacimientos. Por este motivo, a menudo se considera el conjunto de las tierras raras como un grupo de diecisiete elementos y no de quince.

La Unión Europea ha categorizado los elementos del grupo de las tierras raras dentro de la lista de materias primas críticas, "Critical raw materials" (Chapman et al., 2013). Asimismo, el British Geological Survey también los incluyó en su "Metals Risk List" (British Geological Survey, 2012) con un índice de riesgo de suministro relativo de 9,5 en una escala que va del 1 al 10 de acuerdo con varios factores: concentración de la producción, distribución de las reservas, tasa de reciclaje, sustituibilidad, gobernanza y fracción de metal acompañante.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (2011) en el estudio titulado "Critical Material Strategy", revisó las tierras raras en función de su papel en la producción de energía limpia junto con el riesgo de suministro. Identificaron el neodimio, europio, terbio, disprosio e itrio como tierras raras críticas a corto y medio plazo. El praseodimio también se incluyó en la lista debido al uso de didimio (Nd + Pr) como materia prima principal para los imanes permanentes de neodimio (NdFeB). El disprosio fue la tierra rara declarada como crítica debido a su mayor importancia en la generación de energías limpias y en relación al riesgo de suministro a medio plazo: 2015-2025. Le siguió el terbio, con menor importancia para la generación de energía limpia, y el neodimio, con un menor riesgo de suministro.



Las principales aplicaciones de las tierras raras son las siguientes (ERECON, 2014): imanes permanentes (20%), pulido (15%), catalizadores de craqueo de fluidos (13%), otras metalurgias (10%), baterías (8%), vidrio (7%), fósforos (7%), autocatalizadores (6%), cerámica (5%) y otras aplicaciones (8%).

El presente estudio busca arrojar luz sobre futuras inversiones en proyectos mineros que persigan explotar alguno o varios de los minerales pertenecientes a este grupo. Además, se busca ayudar en la lucha por erradicar varios de los problemas que se dan actualmente en el mercado de las tierras raras: falta de confianza, opacidad del mercado, enfoques a corto y largo plazo y orientación a las ganancias, según lo identificado por Klossek, Kullik y van den Boogaart (2016).

Hasta el año 2010, China había sido el principal impulsor de las tierras raras al comercializar cerca del 90% del suministro a nivel mundial. Fue entonces cuando, tras un recorte en sus explotaciones, los precios se dispararon de forma drástica. Como consecuencia, comenzaron a desarrollarse numerosos proyectos mineros en varios países, muchos de los cuales fracasaron cuando los precios de las tierras raras volvieron a desplomarse en el mercado. Sin embargo, algunos de dichos proyectos consiguieron sobrevivir.

En el primer artículo se analiza, primeramente, la tendencia futura de los precios de los elementos de las tierras raras con el fin de contrastar la tendencia estable pronosticada por distintos proveedores de evaluaciones de precios y datos de mercado.

Dicho análisis de tendencia y variabilidad de los precios en el mercado de las tierras raras, se centra en el óxido de disprosio, ya que su importancia en la fabricación de tecnología para la generación de energía eólica, junto con un mayor riesgo de suministro, ha incentivado a las economías en desarrollo a emprender acciones para apoyar su abastecimiento (Baldi, Peri & Vandone, 2014). El neodimio también es un elemento muy importante para la generación de energías limpias, pero es mucho más abundante que el disprosio, por lo que el estudio también se centra en este último.

En segundo lugar, se analizan cinco proyectos de minería de tierras raras en distintas partes del mundo: el Proyecto Nechalacho (Territorios del Noroeste, Canadá); Proyecto Zandkopsdrift (Northern Cape, Sudáfrica); Proyecto Bear Lodge (Wyoming, EE. UU.); Proyecto Kvanefjeld (Sur de Groenlandia); y el Proyecto Dubbo Zirconia (Nueva Gales del Sur, Australia).

Con el estudio de los proyectos anteriores se busca dar un "orden de magnitud" tanto técnico como económico en esta industria minera. Por otro lado, se busca además proporcionar una herramienta para inversores, inversores potenciales y asesores profesionales que aborden el análisis de inversión en minería de tierras raras y así facilitar el desarrollo de evaluaciones económicas preliminares de futuros proyectos mineros.

Estos objetivos también ayudarán a luchar contra los problemas sistémicos del mercado de tierras raras citados anteriormente.

Las conclusiones muestran claramente que, a pesar de la complejidad de los depósitos de minerales de tierras raras y el hecho de que su operación minera generalmente incluye diferentes subproductos, la evaluación de las inversiones en minería de tierras raras no presenta mucha más dificultad que en el caso de proyectos de minería de un solo elemento. Los precios pronosticados utilizados en estos estudios económicos son el talón de Aquiles del análisis de inversión en minería de tierras raras en la actualidad.

Aunque las diferencias en la demanda de diferentes elementos de tierras raras harán que sea realmente difícil lograr un mercado “a priori” en equilibrio, se anticipa que los cinco proyectos estudiados cubrirán aproximadamente la tercera parte del consumo total de tierras raras en el mundo.

Con el fin de apoyar el estudio realizado y las conclusiones obtenidas en el primer artículo (que persiguen entre otros disipar la opacidad del mercado de las tierras raras y apoyar los análisis técnico-económicos preliminares en futuros proyectos mineros), se lleva a cabo en el segundo artículo un análisis centrado en el aspecto económico, que estudia la variabilidad de los precios de las tierras raras en el mercado apoyándose en el desarrollo de la “teoría de las series temporales transgénicas”.

Una serie temporal puede considerarse como un organismo numérico con una naturaleza continua desde un punto de vista cronológico que se actualiza de forma permanente. Hasta este momento, la investigación de series de tiempo relacionadas con sus características y rasgos se centra principalmente en la minería de datos, con el fin de descubrir información oculta o conocimiento específico dentro de las series de tiempo o sus transformaciones. Sin embargo, la representación de series temporales es crucial, ya que son difíciles de manejar en su estructura original debido a su alta dimensionalidad.

La "teoría de series temporales transgénicas" se aplica a la previsión de varios precios de óxidos de tierras raras, concretamente: disprosio, europio, terbio, neodimio y óxidos de praseodimio. Esta teoría aborda, específicamente, la existencia de ciclos en los precios de los metales y la presencia de fenómenos anómalos (crecimientos o decrecimientos muy significativos) que la teoría permite eliminar de la serie temporal, mejorando así la precisión del pronóstico.

Después de representar la serie temporal de una manera que permite secuenciar su genoma, se define una enzima de restricción para crear una serie temporal genéticamente modificada. No hubo necesidad de desarrollar ADN ligasas ya que las series temporales se pueden cortar y pegar sin más consideraciones.

Los resultados indican claramente que las series temporales transgénicas conducen a pronósticos más precisos a corto plazo, en aquellos casos en los que se puede representar

un genoma consistente.

Futuras investigaciones deberían abordar la viabilidad de desarrollar pronósticos más precisos a largo plazo mediante la adición de nuevas secuencias de genes basadas en el genoma de la serie temporal, a fin de lograr una mayor confianza de los inversores y asesores profesionales en los estudios de viabilidad desarrollados para futuros proyectos de inversión minera.

Finalmente, debe observarse que esta teoría no tiene nada que ver con los "algoritmos genéticos", una metaheurística inspirada en el proceso de selección natural y no en la secuenciación y manipulación del genoma.

Para completar los estudios llevados cabo en el primer y segundo artículo y basándose en los órdenes de magnitud tanto técnicos como económicos de esta industria minera previamente estimados, se aborda la realización de la evaluación económica preliminar del proyecto Sarfartoq en Groenlandia a los efectos de demostrar cómo este enfoque puede ayudar a defender decisiones estratégicas rápidas, tempranas y solventes, especialmente cruciales para las empresas mineras junior dadas sus limitaciones de financiación. A estos efectos, se utiliza única y exclusivamente información procedente de los sondeos realizados, de las características geológicas de área y de los análisis realizados sobre las muestras.

Para llevar a cabo el estudio indicado, se utilizan dos softwares mineros: SURPAC y RECMIN. Inicialmente, se analiza la geografía de la zona a estudiar mediante la introducción en SURPAC de los modelos digitales de elevación, curvas de nivel y mapas ortofoto de la zona de estudio. Posteriormente, se introducen los datos correspondientes a los sondeos llevados a cabo en la fase de análisis y prospección minera del proyecto.

Una vez completada la topografía de la zona, se procede a generar el modelo de bloques correspondiente al yacimiento, que se apoya en el estudio del contenido de la proporción de los distintos minerales encontrados en los sondeos realizados en la fase de prospección. Un modelo de bloques permite establecer una imagen clara de las reservas de mineral que ofrece un yacimiento concreto, permitiendo planificar de este modo tanto la extracción de dichos recursos minerales como plantear un estudio inicial de viabilidad técnico-económica de explotación del mismo.

Gracias al estudio del modelo de bloques generado, se consigue una propuesta de corta óptima para la extracción de los recursos minerales en la que se apoyará el estudio de viabilidad técnico-económica del proyecto.

1.2.- Objetivos

El objetivo principal de la presente tesis doctoral es combatir los problemas sistémicos a los que se enfrenta la inversión en minería de tierras raras: falta de confianza de los

inversores, opacidad del mercado y existencia mayoritaria de enfoques empresariales a corto plazo orientados hacia la obtención de beneficios rápidos.

El antedicho objetivo principal se concretó en los siguientes objetivos específicos:

En primer lugar, determinar los “órdenes de magnitud”, tanto técnicos como económicos de esta industria minera, con el propósito de facilitar el desarrollo de evaluaciones económicas preliminares de futuros proyectos mineros de inversión de tierras raras.

En segundo lugar, analizar la razonabilidad de los resultados financieros presentados por distintas compañías en relación a proyectos de inversión en minería de tierras raras.

En tercer lugar, analizar la variabilidad de los precios de las tierras raras, dado que se encuentran sometidos a fuertes oscilaciones debido a la existencia de un mercado imperfectos dada la alta importancia de China en el mismo.

En cuarto lugar, desarrollar una metodología que permita una mayor precisión a la hora de estimar la futura evolución de los precios de tierras raras.

En quinto y último lugar, abordar la realización de la evaluación económica preliminar de un proyecto, utilizando única y exclusivamente información procedente de los sondeos efectuados, de las características geológicas de área y de los análisis realizados sobre las muestras, a fin de contrastar la viabilidad de utilizar los “órdenes de magnitud” previamente estimados para esta industria.

1.3.- Metodología

A lo largo de la presente investigación se ha aplicado una metodología propia del campo de investigación y de larga trayectoria en el mismo. Las principales etapas de esta se describen a continuación.

1. Investigación bibliográfica sobre la minería de las tierras raras, centrada fundamentalmente en el World of Science (WoS).
2. Estudio detallado de los estándares mundiales sobre informes de resultados de exploración, recursos y reservas minerales: PERC Reporting Standard, JORC Code, SME Guide, SAMREC Code, NI-43 101, NAEN Code, etc.
3. Análisis de los principales proyectos de inversión en minería de tierras raras que existían en el momento de desarrollar a tesis doctoral a nivel mundial: Proyecto Nechalacho (Territorios del Noroeste, (Canadá), Proyecto Zandkopsdrift (Cabo Norte, Suráfrica), Proyecto Bear Lodge (Wyoming, EEUU), Proyecto Kvanefjeld (Groenlandia) y Proyecto Dubbo Zirconia Project (Nueva Gales del Sur, Australia).
4. Análisis de la evolución prevista de los precios de tierras raras utilizando métodos tradicionales de análisis de series temporales.
5. Estimación de los órdenes de magnitud técnicos y económicos de la industria



- minera de tierras raras a partir de los proyectos analizados.
6. Análisis de la razonabilidad de los resultados financieros presentados por los distintos proyectos de inversión previamente analizados.
 7. Elaboración de una metodología que permita obtener una estimación de la evolución de los precios de tierras raras más solvente que las utilizadas hasta el momento.
 8. Aplicación de los desarrollos anteriores a un proyecto de inversión en minería de tierras raras en curso: proyecto Sarfartoq en Groenlandia.
 9. Obtención de conclusiones.

1.4.- Medios y recursos materiales

Se dispuso de todos los medios e información necesaria para llevar a cabo el presente trabajo, destacando entre ellos:

- a) Acceso al World of Science (WoS).
- b) Precios europeos mensuales desde principios de 2001 hasta la fecha de comienzo del trabajo (2016) de los siguientes compuestos: óxido de disprosio, óxido de europio, óxido de neodimio, óxido de praseodimio y óxido de terbio.
- c) Estudios preliminares de viabilidad o estudios de viabilidad de los siguientes proyectos: Proyecto Nechalacho (Territorios del Noroeste, (Canadá), Proyecto Zandkopsdrift (Cabo Norte, Suráfrica), Proyecto Bear Lodge (Wyoming, EEUU), Proyecto Kvanefjeld (Groenlandia) y Proyecto Dubbo Zirconia Project (Nueva Gales del Sur, Australia).
- d) @RISK 6, from Palisade Corporation (Ithaca, New York), para análisis de riesgos, series temporales, redes neuronales y algoritmos genéticos.
- e) SURPAC software (Dassault Systèmes Canada Software Inc., Vancouver), para evaluación de recursos y reservas minerales.
- f) RECMIN software (César Castañón, Universidad de Oviedo), para evaluación de recursos y reservas minerales.
- g) Información procedente de los sondeos efectuados, de las características geológicas de área y de los análisis realizados sobre las muestras, referentes al Proyecto Sarfartoq en Groenlandia.

2.- ARTÍCULOS SELECCIONADOS

2.1.- “Rare earth elements mining investment: It is not all about China”

Autores: María Victoria Riesgo García, Alicja Krzemień, Miguel Ángel Manzanedo del Campo, Mario Menéndez Álvarez, Malcolm Richard Gent

Título: Rare earth elements mining investment: It is not all about China.

Revista: Resources Policy.

Volumen: 53.

Páginas: 66–76.

Editorial: Elsevier.

Año de publicación: 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.004>

JCR Impact Factor 2017: 2,695, Rango 33 de 109 y Cuartil Q2.

Abstract

China was in the past the main driver when analyzing rare earth prices and their market, since it commercialized around the 90% of the world’s supply. After a cut in its exports during 2010 and 2011, rare earth prices dramatically spiked. The world’s reaction to this fact was the development of a huge amount of mining projects outside China, many of whom failed when prices fell again. Nevertheless, several of them survived.

This paper analyses in first place the future trend of rare earth elements prices in order to contrast the stable tendency forecasted by different providers of price assessments and market data. Secondly, it studies in deep five ready-to-go rare earths mining projects around the world: Nechalacho Project (North-west Territories, Canada); Zandkopsdrift Project (Northern Cape, South Africa); Bear Lodge Project (Wyoming, USA); Kvanefjeld Project (Southern Greenland); and Dubbo Zirconia Project (New South Wales, Australia).

The main purposes being to give an “order of magnitude” both technical and economic of this specific mining industry; to provide a tool for investors, potential investors and professional advisers addressing rare earth mining investment analysis; and to facilitate the development of preliminary economic assessments of future rare earth mining projects. These aims will also help to fight against several systemic problems of the rare



earth market: lack of trust, market opacity, and short versus long-term approaches and profit orientation.

Conclusions clearly show that despite the complexity of rare earth mineral deposits and the fact that their mining operation usually includes different by-products, the evaluation of rare earth mining investments does not present much more difficulty than in the case of single element mining projects. Forecasted prices used in these economic studies are the Achilles' heel of nowadays rare earth mining investment analysis.

Finally, although differences in demand of different rare earth elements will make really difficult to achieve "a priori" a market in balance, the five studied projects are anticipated to cover approximately the third part of the total rare earth consumption in the world. When their dysprosium oxide production was analysed, the resulting proportion for the most critical rare earth element based on its role in clean energy together with its biggest supply risk was almost the same, something optimistic regarding the achievement of a balanced market outside China.

Keywords

Rare earth elements, mining project, price forecasting, preliminary economic assessment, scoping study, feasibility study.

References

Alkane Resources Limited (2013). Definitive Feasibility Study confirms robust Dubbo Zirconia Project. ASX and Media Release. 11 April 2013.

<http://www.alkane.com.au/images/pdf/asx/2013/20130411.pdf>

Argus Media Ltd (2014). Argus Rare Earths Monthly Outlook, 14 (11). Monday 3, November 2014.

Argus Media Ltd (2015). Argus Rare Earths: Methodology and Specifications Guide. November 2015.

<http://www.argusmedia.com/~media/files/pdfs/meth/rare-earths.pdf?la=en>

Auger, F. & Guzmán, J.I. (2010). How rational are investment decisions in the copper industry? Resources Policy 35, pp. 292–300.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.07.002>

Baldi, L.; Peri, M. & Vandone, D. (2014). Clean energy industries and rare earth materials: Economic and financial issues. Energy Policy 66, pp. 53–61.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.067>

Bannister, K. (2015). Estimation of Open Cut Mining Recovery and Mining Dilution. Kent Bannister Pty Ltd. (KBPL). Perth, Western Australia.

<http://www.kbpl.com.au/KBPL%20Mining%20Recovery%20and%20Dilution.pdf>

Barakos, G.; Gutzmer, J. & Mischo, H. (2016). Strategic evaluations and mining process optimization towards a strong global REE supply chain. *Journal of Sustainable Mining* 15 (1), pp. 26–35. <http://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.05.002>

Binnemans, K.; Jones, P. T.; Blanpain, B.; Van Gerven, T.; Yang, Y.; Walton, A. & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production* 51, pp. 1–22. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>

Binnemans, K.; Jones, P. T.; Van Acker, K.; Blanpain, B.; Mishra, B. & Apelian, D. (2013). Rare-earth economics: The balance problem. *JOM* 65 (7), pp. 846–848.

<http://doi.org/10.1007/s11837-013-0639-7>

Bluszcz, A.; Kijewska, A. & Sojda, A. (2015). Economic value added in metallurgy and mining sector in Poland. *Metalurgija* 54 (2), pp. 437–440.

British Geological Survey (2015). Risk List 2015.

<http://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=3075>

Chapman, A. et al. (2013). Study on Critical Raw Materials at EU Level. Report for DG Enterprise and Industry. Oakdene Hollins and Fraunhofer ISI.

<http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/5605/attachments/1/translations/en/renditions/native>

Chen, Z. (2011). Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *Journal of Rare Earths* 29(1), pp. 1–6. [http://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60401-2](http://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60401-2)

CIM Definition Standards (2014). CIM Definition Standards on Mineral Resources and Reserves. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) Standing Committee on Reserve Definitions.

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiiosLMmaLpAhXQTxUIHUMgCrcQFjAAegQIAhAB&url=http%3A%2F%2Fwww.crirsc.com%2Fdocs%2Fcim_definition_standards_20142.pdf&usg=AOvVaw1b6pL_3_sTyQmJLwEivDRU

Elshkaki, A., & Graedel, T. E. (2014). Dysprosium, the balance problem, and wind power technology. *Applied Energy* 136, pp. 548–559.

<http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.064>



Ebrahimi, A., 2013. An Attempt to Standardize the Estimation of Dilution Factor for Open Pit Mining. World Mining Congress, Montreal, Canada.

ERECOM (2014). Strengthening the European Rare Earths Supply Chain: Challenges and Policy Options. European Rare Earths Competency Network. Kooroshy, J.; Tiess, G.; Tukker, A. & Walton, A. (eds.).

<http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/10882/attachments/1/translations/en/renditions/native>

Greenland Minerals and Energy Ltd. (2015). Kvanefjeld Project Feasibility Study - Executive summary. May, 2015.

<http://www.ggg.gl/docs/ASX-announcements/Kvanefjeld-Feasibility.pdf>

Greenland Minerals and Energy Ltd. (2016). Kvanefjeld Feasibility Study Update: Conservative Assumptions, Robust Metrics, High-Value Rare Earth and Uranium Project. Company Announcement 6th April, 2016.

<http://www.ggg.gl/docs/ASX-announcements/Feasibility-Study-Update-April-2016.pdf>

Golev, A.; Scott, M.; Erskine, P. D.; Ali, S. H. & Ballantyne, G. R. (2014). Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities. *Resources Policy* 41 (1), pp. 52–59. <http://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.03.004>

Habib, K., & Wenzel, H. (2014). Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling. *Journal of Cleaner Production* 84 (1), pp. 348–359. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.035>

JORC Code (2012). Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves. The Joint Ore Reserves Committee of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia). <http://www.jorc.org>

Kilbourn, B.T. (1993). *A Lanthanide Lanthology: A Collection of Notes Concerning the Lanthanides and Related Elements*. Molycorp, Inc. Mountain Pass, CA, USA.

Klossek, P.; Kullik, J. & van den Boogaart, K. G. (2016). A systemic approach to the problems of the rare earth market. *Resources Policy* 50, pp. 131–140.

<http://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.09.005>

Krzemień, A.; Riesgo Fernández, P.; Suárez Sánchez, A. & Diego Álvarez, I. (2016). Beyond the pan-european standard for reporting of exploration results, mineral resources and reserves. *Resources Policy* 49, pp. 81–91.

<http://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.008>

Krzemień, A., Riesgo Fernández, P., Suárez Sánchez, A., & Sánchez Lasheras, F. (2015). Forecasting European thermal coal spot prices. *Journal of Sustainable Mining* 14, pp. 203–210. <http://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.04.002>

Labys, W. C., Lesourd, J. B., & Badillo, D. (1998). The existence of metal price cycles. *Resources Policy*, 24 (3), pp. 147–155. [http://doi.org/10.1016/S0301-4207\(98\)00023-3](http://doi.org/10.1016/S0301-4207(98)00023-3)

Machacek, E. & Fold, N. (2014). Alternative value chains for rare earths: The anglo-deposit developers. *Resources Policy* 42, pp. 53–64.

<http://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.09.003>

Massari, S. & Ruberti, M. (2013). Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy* 38, pp. 36–43.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.07.001>

McLellan, B. C.; Corder, G. D.; Golev, A. & Ali, S. H. (2014). Sustainability of the Rare Earths Industry. *Procedia Environmental Sciences* 20, pp. 280–287.

<http://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.035>

Micon International Limited (2013). NI 43-101 Technical report disclosing the results of the feasibility study on the Nechalacho Rare Earth Elements Project. Avalon Advanced Materials Inc.

http://avalonadvancedmaterials.com/resources/projects/may_2013_ni43_report.pdf

National Instrument 43-101 (2011). Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators.

http://web.cim.org/standards/documents/Block484_Doc111.pdf

PERC Reporting Standard (2013). Pan-European Standard for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Reserves. The Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee. Belgium.

http://www.vmine.net/perc/documents/PERC_REPORTING_STANDARD_2013%20rev1.pdf

Roche Engineering Inc. (2014). Bear Lodge Project. Canadian NI 43-101 Pre-Feasibility Study Report on the Reserves and Development of the Bull Hill Mine, Wyoming. Rare Element Resources Ltd.

http://www.rareelementresources.com/App_Themes/NI43-101PreFeasibilityStudyReport/HTML/#1



Suárez Sánchez, A.; Krzemień, A.; Riesgo Fernández, P.; Iglesias Rodríguez, F.J.; Sánchez Lasheras, F. & de Cos Juez, F.J. (2015). Investment in new tungsten mining projects. *Resources Policy* 46 (2), pp. 177–190.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.10.003>

US Department of Energy (2011). *Critical Materials Strategy*. December, 2011. DOE/PI-0009.

http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf

US Intelligence Community (2013). *Worldwide Threat Assessment*. Statement for the Record. March 12, 2013.

<http://nsarchive.gwu.edu/NSAEBB/NSAEBB424/docs/Cyber-090.pdf>

Venmyn Deloitte Ltd. (2015). *National Instrument 43-101 Independent Technical Report on the results of a Preliminary Feasibility Study on the Zandkopsdrift Rare Earth Element and Manganese By-product Project in the Northern Cape province of South Africa*. Frontier Rare Earths Ltd.

<http://www.frontierrareearths.com/wp-content/uploads/2015/06/Zandkopsdrift-PFS-June-2015-Sedar.pdf>

2.2.- “Rare earth elements price forecasting by means of transgenic time series developed with ARIMA models”

Autores: María Victoria Riesgo García, Alicja Krzemień, Miguel Ángel Manzanedo del Campo, Carmen Escanciano García-Miranda, Fernando Sánchez Lasheras

Título: Rare earth elements price forecasting by means of transgenic time series developed with ARIMA models.

Revista: Resources Policy.

Volumen: 59.

Páginas: 95–102.

Editorial: Elsevier.

Año de publicación: 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.06.003>

JCR Impact Factor 2018: 3,185, Rango 30 de 116 y Cuartil Q2.

Abstract

A time series can be thought of as a numerical organism with a continuous nature from a chronological point of view and something that is permanently updated. Up to this moment time series research related with their features, traits, and characteristics, is mainly focused on data mining, in order to discover hidden information or specific knowledge within the time series or their transformations. However, time series representation is crucial, as they are difficult to handle in their original structure due to their high dimensionality.

In this paper, the “theory of transgenic time series” is developed, and applied to the forecasting of several rare earth oxide prices: dysprosium, europium, terbium, neodymium, and praseodymium oxides.

After representing the time series in a way that allows their genome to be sequenced, a restriction enzyme is defined in order to create a genetically modified time series. There was no need to develop DNA ligases as time series can be cut and pasted without further considerations.

Results clearly state that transgenic time series lead to more accurate short term forecasts



in cases where a consistent time series genome can be represented. Further research should address the feasibility of developing more accurate long-term forecasts by adding new gene sequences based on the time series genome, in order to achieve greater confidence from investors and professional advisers in the feasibility studies developed for future mining investment projects.

Keywords

Rare earth elements, Price forecasting, Time series representation, Transgenic time series, Genetically modified time series, Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA).

References

Agrawal, R., Faloutsos, C., & Swami, A. (1993). Efficient similarity searching sequence databases. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Foundations of Data Organization and Algorithms, 69–84.

Chapman, A., Arendorf, J., Castella, T., Thompson, P., Willis, P., Tercero Espinoza, L., Wichmann, E. (2013). Study on Critical Raw Materials at EU level Final Report. A report for DG Enterprise and Industry. Oakdene Hollins and Faunhofer ISI. Retrieved from <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/5605/attachments/1/translations/en/renditions/native>

Chou, J.-S., & Ngo, N.-T. (2016). Time series analytics using sliding window metaheuristic optimization-based machine learning system for identifying building energy consumption patterns. *Applied Energy*, 177, 751–770.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.074>

Fu, T. C. (2011). A review on time series data mining. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(1), 164–181. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.09.007>

Gong, X., Si, Y. W., Fong, S., & Biuk-Aghai, R. P. (2016). Financial time series pattern matching with extended UCR Suite and Support Vector Machine. *Expert Systems with Applications*, 55, 284–296. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.02.017>

Gullo, F., Ponti, G., Tagarelli, A., & Greco, S. (2009). A time series representation model for accurate and fast similarity detection. *Pattern Recognition*, 42(11), 2998–3014. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2009.03.030>

Hyndman, R. (2017). Package “forecast”: Forecasting Functions for Time Series and Linear Models. Forecast package for R. Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/forecast/forecast.pdf>

Hyndman, R., & Khandakar, Y. (2008). Automatic time series forecasting: The forecast package for R. *Journal Of Statistical Software*, 27(3), 1–22.

<https://doi.org/10.18637/jss.v027.i03>

Krawczak, M., & Szkatuła, G. (2014). An approach to dimensionality reduction in time series. *Information Sciences*, 260, 15–36. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.10.037>

Krzemień, A., Riesgo Fernández, P., Suárez Sánchez, A., & Sánchez Lasheras, F. (2015). Forecasting European thermal coal spot prices. *Journal of Sustainable Mining*, 14, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.04.002>

Labys, W. C., Lesourd, J. B., & Badillo, D. (1998). The existence of metal price cycles. *Resources Policy*, 24(3), 147–155. [https://doi.org/10.1016/S0301-4207\(98\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4207(98)00023-3)

Lahmiri, S. (2016). A variational mode decomposition approach for analysis and forecasting of economic and financial time series. *Expert Systems with Applications*, 55, 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.02.025>

Liao, T. W., Ting, C.-F., & Chang, P.-C. (2006). An adaptive genetic clustering method for exploratory mining of feature vector and time series data. *International Journal of Production Research*, 44(14), 2731–2748. <https://doi.org/10.1080/00207540600600130>

Mannfolk, P., Wirestam, R., Nilsson, M., Ståhlberg, F., & Olsrud, J. (2010). Dimensionality reduction of fMRI time series data using locally linear embedding. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, 23(5–6), 327–338. <https://doi.org/10.1007/s10334-010-0204-0>

Ordóñez Galán, C., Sánchez Lasheras, F., de Cos Juez, F. J., & Bernardo Sánchez, A. (2017). Missing data imputation of questionnaires by means of genetic algorithms with different fitness functions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 311(2), 704–717. <https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.cam.2016.08.012>

R Core Team. (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.r-project.org/>

Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Manzanedo del Campo, M. Á., Menéndez Álvarez, M., & Gent, M. R. (2017). Rare earth elements mining investment: It is not all about China. *Resources Policy*, 53(April), 66–76.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.004>

Sánchez Lasheras, F., de Cos Juez, F. J., Suárez Sánchez, A., Krzemień, A., & Riesgo Fernández, P. (2015). Forecasting the COMEX copper spot price by means of neural networks and ARIMA models. *Resources Policy*, 45, 37–43.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.03.004>



Sato, A. H. (2013). A comprehensive analysis of time series segmentation on Japanese stock prices. *Procedia Computer Science*, 24, 307–314.

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.10.055>

Sober, E. (2002). Instrumentalism, parsimony, and the akaike framework. *Philosophy of Science*, 69, 112–123.

Suárez Sánchez, A., Riesgo Fernández, P., Sánchez Lasheras, F., De Cos Juez, F. J., & García Nieto, P. J. (2011). Prediction of work-related accidents according to working conditions using support vector machines, 218, 3539–3552.

<https://doi.org/10.1016/j.amc.2011.08.100>

Sugiura, N. (1978). Further analysis of the data by Akaike's information criterion of model fitting. *Suri-Kagaku (Mathematic Science)*, 153, 12–18.

<https://doi.org/10.1080/03610927808827599>

Tseng, V. S., Chen, C. H., Huang, P. C., & Hong, T. P. (2008). A cluster-based genetic approach for segmentation of time series and pattern discovery. 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2008, 1949–1953.

<https://doi.org/10.1109/CEC.2008.4631055>

Tseng, V. S., Chen, C. H., Huang, P. C., & Hong, T. P. (2009). Cluster-based genetic segmentation of time series with DWT. *Pattern Recognition Letters*, 30(13), 1190–1197.

<https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.05.013>

U.S. Department of Energy. (2011). Critical Materials Strategy 2011. *Energy*, 191. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf

Wang, Q., & Megalooikonomou, V. (2008). A dimensionality reduction technique for efficient time series similarity analysis. *Information Systems*, 33(1), 115–132.

<https://doi.org/10.1016/j.is.2007.07.002>

Wang, Q., Megalooikonomou, V., & Faloutsos, C. (2010). Time series analysis with multiple resolutions. *Information Systems*, 35(1), 56–74.

<https://doi.org/10.1016/j.is.2009.03.006>

Wu, J. L., & Chang, P.-C. (2012). A Trend-Based Segmentation Method and the Support Vector Regression for Financial Time Series Forecasting. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2012/615152>

Yang, Q., Wu, X., Domingos, P., Elkan, C., Gehrke, J., Han, J., Wah, B. W. (2006). 10 Challenging Problems in Data Mining Research. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 5(4), 597–604.

<https://doi.org/10.1142/S0219622006002258>

Yin, Y., Shang, P., & Xia, J. (2015). Compositional segmentation of time series in the financial markets. *Applied Mathematics and Computation*, 268, 399–412.

<https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.06.061>

2.3.- “Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding on further project developments”

Autores: María Victoria Riesgo García, Alicja Krzemień, Lourdes Cecilia Sáiz Bárcena, Isidro Diego Álvarez, César Castañón Fernández

Título: Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding on further project developments.

Revista: Resources Policy.

Volumen: 64.

Identificador artículo: 101525.

Editorial: Elsevier.

Año de publicación: 2019.

DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101525>

JCR Impact Factor 2018: 3,185, Rango 30 de 116 y Cuartil Q2.

Abstract

According to the JORC Code and the PERC Reporting Standard, the main aim of scoping studies is to be used internally by mineral exploration and development companies for planning and comparative purposes, although they are publicly disclosed in some cases.

This paper demonstrates that scoping studies based on adequate data gathered from different mining investment projects around the world can help make the case for quick, early and sound strategic decisions, which may be especially crucial for junior mining companies.

The basis for the analysis is the previously developed study ‘Rare earth elements mining investment: It is not all about China’, in which five ready-for-launch rare earth element mining investment projects around the world were analysed: The Bear Lodge project in the USA, the Zandkopsdrift project in South Africa, the Kvanefjeld project in Southern Greenland, the Dubbo Zirconia project in Australia, and the Nechalacho project in Canada. Its purpose was to provide a tool for investors, potential investors and professional advisers addressing rare earth mining investment analysis and to facilitate the development of scoping studies of future rare earth mining projects.



The case study used is the Sarfartoq Rare Earth Element Project in Greenland. From this project, the authors use information related only to significant drill intercepts, the geological characteristics of the area and the analysis made of the samples that were presented in the preliminary economic assessment. Thus, the conclusions obtained cannot be considered in any way to be professional advice or investment recommendations.

Keywords

Rare earth elements, Mining project, Mining investment, Scoping study, Preliminary economic assessment, Mineral resources.

References

Alkane Resources Ltd. (2013). Definitive Feasibility Study confirms robust Dubbo Zirconia Project. ASX and Media Release. 11 April, 2013.

Avalon Advanced Materials Inc. (2013). NI 43-101 Technical report disclosing the results of the feasibility study on the Nechalacho Rare Earth Elements Project. Micon International Ltd. Retrieved from

http://avalonadvancedmaterials.com/resources/projects/may_2013_ni43_report.pdf%0A

Bluszcz, A., Kijewska, A., & Sojda, A. (2015). Economic Value Added in Metallurgy and Mining Sector in Poland. *Metalurgija*, 54(2), 437–440. Retrieved from <http://hrcak.srce.hr/file/190525>

Castañón Fernández, C. (2018). RECMIN & RECMIN PRO (Mineral Resources software). Retrieved from <https://recmin.com/WP/>

CIM Standing Committee on Reserve Definitions. (2014). CIM Definition Standards for Mineral Resources and Mineral Reserves. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Westmount, Quebec, Canada. Retrieved from

http://www.cim.org/~media/Files/PDF/Subsites/CIM_DEFINITION_STANDARDS_20142

Dassault Systèmes Canada Software. (2018). SURPAC. Vancouver, Canada.

Druecker, M., & Simpson, R. G. (2012). Technical Report on the Safartoq Project West Greenland. Retrieved from http://www.hudsonresources.ca/files/hudson_43-101_30may12.pdf

Ebrahimi, A. (2013). An Attempt to Standardize the Estimation of Dilution Factor for Open Pit Mining. In 23rd World Mining Congress. 11-15 August 2013, Montréal, Canada.

Frontier Rare Earths Ltd. (2015). National Instrument 43-101 Independent Technical Report on the results of a Preliminary Feasibility Study on the Zandkopsdrift Rare Earth Element and Manganese By-product Project in the Northern Cape province of South Africa. Venmyn Deloitte Ltd. Retrieved from <http://www.frontierrareearths.com/wp-content/uploads/2015/06/Zandkopsdrift-PFS-June-2015-Sedar.pdf%0A>

Greenland Minerals and Energy Ltd. (2016). Kvanefjeld Feasibility Study Update: Conservative Assumptions, Robust Metrics, High-Value Rare Earth and Uranium Project. Company Announcement 6th April, 2016. Retrieved from <http://www.ggg.gl/docs/ASX-announcements/Feasibility-Study-Update-April-2016.pdf%0A>

Hudson Resources Inc. (2011a). Hudson reports robust preliminary economic assessment (PEA) for the Sarfartoq rare earth project in Greenland. TSX Release. December 7, 2011.

Hudson Resources Inc. (2011b). Preliminary Economic Assessment on the Sarfartoq Rare Earth Element Project, Greenland. Tetra Tech Wardrop. Vancouver, British Columbia, Canada. Retrieved from <http://www.hudsonresources.ca/files/HUD-PEA-SARFARTOQ-2011.pdf>

Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). Open Pit Mine Planning & Design. Volume 1 - Fundamentals (3rd ed.). The Netherlands: CRC Press/Balkema.

JORC Code. (2012). Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves. Australasian Joint Ore Reserves Committee. Victoria, Australia. Retrieved from http://www.jorc.org/docs/JORC_code_2012.pdf

Krzemień, A., Riesgo Fernández, P., Suárez Sánchez, A., & Diego Álvarez, I. (2016). Beyond the pan-european standard for reporting of exploration results, mineral resources and reserves. Resources Policy, 49, 81–91.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.008>

London Stock Exchange plc. (2006). AIM Rules - Guidance for Mining and Oil & Gas Companies. Stock Exchange AIM Notice. London, United Kingdom. Retrieved from <http://www.londonstockexchange.com/companies-and-advisors/aim/advisors/rules/guidance-note.pdf>

Matyjaszek, M., Riesgo Fernández, P., Krzemień, A., Wodarski, K., & Fidalgo Valverde, G. (2019). Forecasting coking coal prices by means of ARIMA models and neural networks, considering the transgenic time series theory. Resources Policy, 61(December 2018), 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.02.017>

Matyjaszek, M., Wodarski, K., Krzemień, A., Escanciano García-Miranda, C., & Suárez Sánchez, A. (2018). Coking coal mining investment: Boosting European Union's raw materials initiative. Resources Policy, 57(December 2017), 88–97.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.01.012>



NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. (2009). ASTER Global Digital Elevation Model [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.002>

NI 43-101. (2011). Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators. Retrieved from

http://web.cim.org/standards/documents/Block484_Doc111.pdf

PERC Reporting Standard. (2017). Pan-European Standard for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Reserves. Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee. Bruxelles, Belgium. Retrieved from

http://www.vmine.net/PERC/documents/PERC_REPORTING_STANDARD_2017.pdf

PwC. (2018a). Greenland: Corporate - Deductions. Retrieved November 30, 2018, from <http://taxsummaries.pwc.com/ID/Greenland-Corporate-Deductions>

PwC. (2018b). Greenland: Corporate - Taxes on corporate income. Retrieved November 30, 2018, from <http://taxsummaries.pwc.com/ID/Greenland-Corporate-Taxes-on-corporate-income>

Rare Element Resources Ltd. (2014). Bear Lodge Project. Canadian NI 43-101 Pre-Feasibility Study Report on the Reserves and Development of the Bull Hill Mine, Wyoming. Roche Engineering Inc. Retrieved from

http://www.rareelementresources.com/App_Themes/NI43-101PreFeasibilityStudyReport/HTML/#1

Rendu, J.-M. (2014). An Introduction to Cut-Off Grade Estimation (2nd Revise). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Englewood, Colorado.

Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Manzanedo del Campo, M. Á., Escanciano García-Miranda, C., & Sánchez Lasheras, F. (2018). Rare earth elements price forecasting by means of transgenic time series developed with ARIMA models. Resources Policy, (February). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.06.003>

Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Manzanedo del Campo, M. Á., Menéndez Álvarez, M., & Gent, M. R. (2017). Rare earth elements mining investment: It is not all about China. Resources Policy, 53(April), 66–76.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.004>

Steffen, O. K. H., Contreras, L. F., Terbrugge, P. J., & Venter, J. (2008). A risk evaluation approach for pit slope design. Proceedings 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, ARMA 08-23, 1–18.

Sterba, J., Krzemień, A., Fidalgo Valverde, G., Riesgo Fernández, P., & Escanciano García-Miranda, C. (2019). Lithium mining: Accelerating the transition to sustainable energy. *Resources Policy*, 62(April), 416–426.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.05.002>

U.S. Department of Energy. (2011). Critical Materials Strategy 2011. *Energy*, 191. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf

Vaněk, M., Bora, P., Maruszewska, E. W., & Kašparková, A. (2017). Benchmarking of mining companies extracting hard coal in the Upper Silesian Coal Basin. *Resources Policy*, 53(March), 378–383. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.07.010>

Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2005). *Rock Slope Engineering, Civil and Mining* (4th ed.). London and New York: Spon Press, Taylor and Francis Group.



3.- CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado durante esta tesis doctoral, ha permitido alcanzar las siguientes conclusiones:

1. Todos los proyectos analizados en la tesis doctoral utilizan leyes de corte físicas (1 – 1,5% TREO, 0,015% U_3O_8 ó una combinación de leyes de tierras raras y otros subproductos), salvo el proyecto Nechalacho, que es el único que utiliza una ley de corte económica.
2. Las leyes de las reservas de TREO de la mayor parte de los proyectos se sitúan en torno al 1 – 2%. Por otra parte, cuando se explotan adicionalmente subproductos, salvo en el caso del U_3O_8 , las leyes de los mismos suelen ser superiores al 2,5%.
3. Para la realización de evaluaciones económicas preliminares de proyectos de minería de tierras raras, se propone el uso de una dilución del 5% para depósitos masivos y del 10% para depósitos de tipo tabular.
4. También se propone la utilización de una ratio de extracción del 97,5% para depósitos masivos, del 95% para depósitos de tipo tabular y del 80% para depósitos tipo diques o skarn.
5. Análogamente se propone un grado de recuperación metalúrgica del 79% y un grado de recuperación en el proceso de separación del 97%.
6. Para los proyectos de minería de tierras raras a cielo abierto, ha sido posible establecer una relación lineal entre el monto de la inversión (en millones de dólares), las toneladas tratadas anualmente en la planta (en miles) y la suma de las leyes de todos los productos y subproductos tratados, con un R^2 del 99,33%.
7. También para el caso de los proyectos de minería a cielo abierto ha sido posible obtener una relación entre los costes de minería (dólares por tonelada de mena), las toneladas explotadas anualmente (en miles), la suma de las leyes de todos los productos y subproductos tratados, y las toneladas de producción total anual de productos y subproductos (en miles).
8. Igualmente fue posible obtener una relación entre los costes de procesado (dólares por tonelada de mena), las toneladas explotadas anualmente (en miles), las toneladas tratadas anualmente en la planta (en miles), la suma de las leyes de todos los productos y subproductos tratados, las toneladas de producción total anual de productos y subproductos (en miles), y los costes de minería (dólares por tonelada de mena).



9. Los costes de separación (dólares por tonelada de mena) pudieron relacionarse con las toneladas anuales separadas de REO (en miles), la ley de entrada en planta de los REO, y la producción total anual de REO (en miles).
10. Los costes de administración se situaron en torno al 6% de los costes totales de minería, procesado y separación, y es posible asumir unos costes de contingencia iguales al 10% de todos los demás costes.
11. Utilizando todas las relaciones anteriores, la mayor desviación observada respecto a los costes operativos reales fue en el caso del proyecto Kvanefjeld, que presentaba unos costes operativos calculados superiores en un 9,94% a los reales.
12. Las proporciones conjuntas de los REO producidos por todos los proyectos analizados permiten ser optimistas en cuanto a la posibilidad de disponer de un mercado equilibrado de tierras raras excluyendo a China, esto es, que las proporciones ofertadas de REO sean similares a las proporciones que demanda el mercado.
13. Las diferencias existentes entre las previsiones de precios utilizadas para estimar los resultados financieros y los precios reales varios años más tarde, permiten confirmar que este aspecto es el auténtico “talón de Aquiles” de las evaluaciones económicas de proyectos de minería de tierras raras.
14. La teoría desarrollada de las “series temporales transgénicas” permite la obtención de previsiones de precios con una mayor precisión, siempre que sea posible obtener una representación adecuada del genoma de las series temporales.
15. Finalmente, todas las conclusiones obtenidas en esta tesis doctoral se han contrastado mediante la realización del estudio económico preliminar del proyecto Sarfartoq en Groenlandia, demostrándose la validez de los planteamientos, así como la inmensa utilidad de desarrollar estos estudios en base a datos obtenidos de diferentes proyectos de inversión alrededor del mundo.

Una vez contrastada la validez de la herramienta propuesta, se debe indicar que su aplicación a proyectos mineros de otros metales y minerales permitirá su perfeccionamiento, así como un conocimiento mucho más profundo de la explotación de los mismos que no está disponible en la actualidad, por lo que el futuro campo de investigación que aparece ante nosotros es inmenso. Análogamente, la teoría de las “series temporales transgénicas” abre todo un abanico de posibilidades en el análisis de series temporales, especialmente con las miras puestas en los análisis a largo plazo, respecto a los cuales prácticamente no existe nada desarrollado.

4.- BIBLIOGRAFÍA

- Adachi, G. Y., Imanaka, N., & Tamura, S. (2010). Research trends in rare earths: A preliminary analysis. *Journal of Rare Earths*, 28(6), 843–846. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(09\)60207-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(09)60207-6)
- Agrawal, R., Faloutsos, C., & Swami, A. (1993). Efficient similarity searching sequence databases. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Foundations of Data Organization and Algorithms*, 69–84.
- Alkane Resources Ltd. (2013). Definitive Feasibility Study confirms robust Dubbo Zirconia Project. ASX and Media Release. 11 April, 2013.
- Androulakis, I., Yang, E., & Almon, R. (2007). Analysis of Time-Series Gene Expression Data: Methods, Challenges, and Opportunities. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.9.060906.151904>. Analysis
- Avalon Advanced Materials Inc. (2013). NI 43-101 Technical report disclosing the results of the feasibility study on the Nechalacho Rare Earth Elements Project. Micon International Ltd. Retrieved from http://avalonadvancedmaterials.com/_resources/projects/may_2013_ni43_report.pdf
- Badham, J., & Williams, P. (1981). Genetic and Exploration Models for Sulfide Ores in Metaophiolites, Northwest Spain. *Economic Geology*, 76(8), 2118–2127. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.76.8.2118>
- Baldi, L., Peri, M., & Vandone, D. (2014). Clean energy industries and rare earth materials: Economic and financial issues. *Energy Policy*, 66, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.067>
- Barakos, G., Gutzmer, J., & Mischo, H. (2016). Strategic evaluations and mining process optimization towards a strong global REE supply chain. *Journal of Sustainable Mining*, 15(1), 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.05.002>
- Batyrshin, I., Solovyev, V., & Ivanov, V. (2014). Time series shape association measures and local trend association patterns. *Neurocomputing*, 175, 924–934. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.05.127>
- Binnemans, K., Jones, P. T., Van Acker, K., Blanpain, B., Mishra, B., & Apelian, D. (2013). Rare-earth economics: The balance problem. *JOM*. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0639-7>
- Binnemans, Koen, Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>
- Bluszcz, A., Kijewska, A., & Sojda, A. (2015). Economic Value Added in metallurgy and mining sector in Poland. *Metalurgija*, 54(2), 437–440. Retrieved from <http://hrcak.srce.hr/file/190525>
- Bozorgebrahimi, E., Hall, R., & Blackwell, G. (2003). Sizing equipment for open pit mining - a review of critical parameters. *Transactions of The Institutions of Mining and Metallurgy. Section A-Mining Technology*, 112(Dec), 171–179. <https://doi.org/10.1179/037178403225003591>
- British Geological Survey. (2015). Risk List 2015. Retrieved from <https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=3075>
- Burkhalter Thiebaut, E., & Vergara Espuelas, R. (2016). Proyecto de Tierras Raras de Matamulas: El Primer Yacimiento de Europa. In *III Jornada La Nueva Minería Española. Grupo especializado en Recursos y Reservas Minerales. Asociación Nacional de Ingenieros de Minas*. 21 April 2016, Madrid. Retrieved from



- http://germ.ingenierosdeminas.org/descargas_2016/presentacion_proyecto_matamulas_abril_2016.pdf
- Burkhalter Thiebaut, E., & Vergara Espuelas, R. (2017). Matamulas Rare Earth Project. In ERES2017 Conference. 2nd Conference on European Rare Earth Resources. 28-31 may 2017, Santorini, Greece. Retrieved from <http://eres2017.eresconference.eu/>
- Castañón, C., Arias, D., Diego, I., Martín-Izard, A., & Ruiz, Y. (2017). Resource and Reserve Calculation in Seam-Shaped Mineral Deposits; A New Approach: “The Pentahedral Method.” *Minerals*, 7(5), 72. <https://doi.org/10.3390/min7050072>
- Castañón Fernández, C. (2019). RECMIN & RECMIN PRO. Mineral Resources software. Asturias, Spain. Retrieved from <https://recmin.com/WP/>
- Castiñeiras, P., Gómez Barreiro, J., Martínez Catalán, J., & Arenas, R. (2002). Nueva interpretación petrológica y tectónica de las anfibolitas pobres en calcio del antiforme de Arinteiro (NO del Macizo Ibérico). I: Descripción de las anfibolitas pobres en calcio y rocas asociadas. *Geogaceta*, 32, 83–85. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10272/9361>
- Cerquitelli, T., Chiusano, S., & Xiao, X. (2016). Exploiting clustering algorithms in a multiple-level fashion: A comparative study in the medical care scenario. *Expert Systems with Applications*, 55, 297–312. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.02.005>
- Chapman, A., Arendorf, J., Castella, T., Thompson, P., Willis, P., Tercero Espinoza, L., Wichmann, E. (2013). Study on Critical Raw Materials at EU level Final Report. A report for DG Enterprise and Industry. Oakdene Hollins and Faunhofer ISI. Retrieved from <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/5605/attachments/1/translations/en/renditions/native>
- Chen, Z. (2011). Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *Journal of Rare Earths*, 29(1), 1–6. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60401-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60401-2)
- Cheong, S. A., Fornia, R. P., Lee, G. H. T., Kok, J. L., Yim, W. S., Xu, D. Y., & Zhang, Y. (2012). The Japanese economy in crises: A time series segmentation study. *Economics*, 6. <https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2012-5>
- Chou, J.-S., & Ngo, N.-T. (2016). Time series analytics using sliding window metaheuristic optimization-based machine learning system for identifying building energy consumption patterns. *Applied Energy*, 177, 751–770. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.074>
- CIM Standing Committee on Reserve Definitions. (2014). CIM Definition Standards for Mineral Resources and Mineral Reserves. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Westmount, Quebec, Canada. Retrieved from http://www.cim.org/~media/Files/PDF/Subsites/CIM_DEFINITION_STANDARDS_20142
- Correia, M. B. (2013). A Study of redundancy and neutrality in evolutionary optimization. *Evolutionary Computation*, 21(3), 413–443. <https://doi.org/10.1162/EVCO>
- Dassault Systemes. (2019). GEOVIA Whittle. Strategic mine planning solution. Retrieved from <https://www.3ds.com/products-services/geovia/products/whittle/>
- Dolenko, S. A., Myagkova, I. N., & Persiantsev, I. G. (2016). The use of artificial neural network segmentation of multivariate time series for the analysis of geomagnetic disturbances. *Moscow University Physics Bulletin*, 71(4), 454–463. <https://doi.org/10.3103/S0027134916040081>

- Druecker, M., & Simpson, R. G. (2012). Technical Report on the Safartog Project West Greenland. Retrieved from http://www.hudsonresources.ca/files/hudson_43-101_30may12.pdf
- Druecker, M., & Simpson, R. G. (2013). Technical Report on the White Mountain Project West Greenland. Retrieved from http://www.hudsonresources.ca/files/Hudson_43-101_17Mar13.pdf
- Ebrahimi, A. (2013). An Attempt to Standardize the Estimation of Dilution Factor for Open Pit Mining. In 23rd World Mining Congress. 11-15 August 2013, Montréal, Canada.
- Elshkaki, A., & Graedel, T. E. (2014). Dysprosium, the balance problem, and wind power technology. *Applied Energy*, 136, 548–559. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.064>
- Espinoza, R. D., & Morris, J. W. F. (2017). Towards sustainable mining (part II): Accounting for mine reclamation and post reclamation care liabilities. *Resources Policy*, 52(January), 29–38. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.01.010>
- Espinoza, R. D., & Rojo, J. (2017). Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. *Resources Policy*, 52(November 2016), 7–18. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.01.011>
- Fernandez, V. (2017). Rare-earth elements market: A historical and financial perspective. *Resources Policy*, 53(May), 26–45. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.010>
- Frontier Rare Earths Ltd. (2015). National Instrument 43-101 Independent Technical Report on the results of a Preliminary Feasibility Study on the Zandkopsdrift Rare Earth Element and Manganese By-product Project in the Northern Cape province of South Africa. Venmyn Deloitte Ltd. Retrieved from <http://www.frontierrareearths.com/wp-content/uploads/2015/06/Zandkopsdrift-PFS-June-2015-Sedar.pdf%0A>
- Fu, T. C. (2011). A review on time series data mining. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(1), 164–181. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.09.007>
- Ge, J., Wang, X., Guan, Q., Li, W., Zhu, H., & Yao, M. (2016). World rare earths trade network: Patterns, relations and role characteristics. *Resources Policy*, 50, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.09.002>
- Githiria, J., & Musingwini, C. (2019). A stochastic cut-off grade optimization model to incorporate uncertainty for improved project value. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119, 217–228.
- Golden Dragon Capital. (2016). Lithium Industry Analysis 2016: How long will the Lithium Prices continue to rise for? Retrieved from <http://www.goldendragoncapital.com/wp-content/uploads/2016/07/Lithium-Industry-Analysis-2016.pdf>
- Golev, A., Scott, M., Erskine, P. D., Ali, S. H., & Ballantyne, G. R. (2014). Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities. *Resources Policy*, 41(1), 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.03.004>
- Gong, X., Si, Y. W., Fong, S., & Biuk-Aghai, R. P. (2016). Financial time series pattern matching with extended UCR Suite and Support Vector Machine. *Expert Systems with Applications*, 55, 284–296. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.02.017>



- Greenland Minerals and Energy Ltd. (2016). Kvanefjeld Feasibility Study Update: Conservative Assumptions, Robust Metrics, High-Value Rare Earth and Uranium Project. Company Announcement 6th April, 2016. Retrieved from <http://www.ggg.gl/docs/ASX-announcements/Feasibility-Study-Update-April-2016.pdf%0A>
- Gullo, F., Ponti, G., Tagarelli, A., & Greco, S. (2009). A time series representation model for accurate and fast similarity detection. *Pattern Recognition*, 42(11), 2998–3014. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2009.03.030>
- Habib, K., & Wenzel, H. (2014). Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling. *Journal of Cleaner Production*, 84(1), 348–359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.035>
- Han, M., & Liu, X. (2013). Feature selection techniques with class separability for multivariate time series. *Neurocomputing*, 110, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.12.006>
- Hedrick, J. B. (1997). Rare-earth metal prices in the USA ca.1960 to 1994. *Journal of Alloys and Compounds*, 250(1–2), 471–481. [https://doi.org/10.1016/s0925-8388\(96\)02532-7](https://doi.org/10.1016/s0925-8388(96)02532-7)
- Hexagon Mining. (2019). MineSight. Planning solution for exploration, modeling, design, scheduling and operation. Tucson, AZ, USA. Retrieved from <https://hexagonmining.com/solutions-old/by-function/planning>
- HONG, F. (2006). Rare Earth: Production, Trade and Demand. *Journal of Iron and Steel Research International*, 13(SUPPL. 1), 33–38. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(06\)60040-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(06)60040-X)
- Hudson Resources Inc. (2011a). Hudson reports robust preliminary economic assessment (PEA) for the Sarfartoq rare earth project in Greenland. TSX Release. December 7, 2011.
- Hudson Resources Inc. (2011b). Preliminary Economic Assessment on the Sarfartoq Rare Earth Element Project, Greenland. Tetra Tech Wardrop. Vancouver, British Columbia, Canada. Retrieved from <http://www.hudsonresources.ca/files/HUD-PEA-SARFARTOQ-2011.pdf>
- Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). *Open Pit Mine Planning & Design. Volume 1 - Fundamentals* (3rd ed.). The Netherlands: CRC Press/Balkema.
- Hyndman, R., & Khandakar, Y. (2008). Automatic time series forecasting: The forecast package for R. *Journal Of Statistical Software*, 27(3), 1–22. <https://doi.org/10.18637/jss.v027.i03>
- Hyndman, Rob. (2017). Package “forecast”: Forecasting Functions for Time Series and Linear Models. Forecast package for R. Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/forecast/forecast.pdf>
- Jamali, S., Jönsson, P., Eklundh, L., Ardö, J., & Seaquist, J. (2015). Detecting changes in vegetation trends using time series segmentation. *Remote Sensing of Environment*, 156, 182–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.010>
- Jaunky, V. C. (2013). A cointegration and causality analysis of copper consumption and economic growth in rich countries. *Resources Policy*, 38(4), 628–639. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.10.001>
- JORC Code. (2012). Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves. Australasian Joint Ore Reserves Committee. Victoria, Australia. Retrieved from http://www.jorc.org/docs/JORC_code_2012.pdf

- Jordens, A., Cheng, Y. P., & Waters, K. E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 41, 97–114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>
- Kalantarian, H., Mortazavi, B., Pourhomayoun, M., Alshurafa, N., & Sarrafzadeh, M. (2016). Probabilistic segmentation of time-series audio signals using Support Vector Machines. *Microprocessors and Microsystems*, 46, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2016.04.011>
- Khan, A., Waqar, M., & Asad, A. (2019). A method for optimal cut-off grade policy in open pit mining operations under uncertain supply. *Resources Policy*, 60(December 2018), 178–184. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.12.003>
- Kim, M. (2012). Time-series dimensionality reduction via Granger causality. *IEEE Signal Processing Letters*, 19(10), 611–614. <https://doi.org/10.1109/LSP.2012.2209641>
- Klossek, P., Kullik, J., & van den Boogaart, K. G. (2016). A systemic approach to the problems of the rare earth market. *Resources Policy*, 50, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.09.005>
- Krawczak, M., & Szkatuła, G. (2014). An approach to dimensionality reduction in time series. *Information Sciences*, 260, 15–36. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.10.037>
- Krzemień, A., Riesgo Fernández, P., Suárez Sánchez, A., & Diego Álvarez, I. (2016). Beyond the pan-european standard for reporting of exploration results, mineral resources and reserves. *Resources Policy*, 49, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.008>
- Krzemień, A., Riesgo Fernández, P., Suárez Sánchez, A., & Sánchez Lasheras, F. (2015). Forecasting European thermal coal spot prices. *Journal of Sustainable Mining*, 14, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.04.002>
- Labys, W. C., Lesourd, J. B., & Badillo, D. (1998). The existence of metal price cycles. *Resources Policy*, 24(3), 147–155. [https://doi.org/10.1016/S0301-4207\(98\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4207(98)00023-3)
- Lahmiri, S. (2016). A variational mode decomposition approach for analysis and forecasting of economic and financial time series. *Expert Systems with Applications*, 55, 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.02.025>
- Lee, Y. S., & Tong, L. I. (2011). Forecasting time series using a methodology based on autoregressive integrated moving average and genetic programming. *Knowledge-Based Systems*, 24(1), 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2010.07.006>
- Lesage, M., Juliani, C., & Ellefmo, S. L. (2018). Economic Block Model Development for Mining Seafloor Massive Sulfides. *Minerals*, 8, 468. <https://doi.org/10.3390/min8100468>
- Liao, T. W., Ting, C.-F., & Chang, P.-C. (2006). An adaptive genetic clustering method for exploratory mining of feature vector and time series data. *International Journal of Production Research*, 44(14), 2731–2748. <https://doi.org/10.1080/00207540600600130>
- Lili, L., & Chengmei, D. (2013). Research of the influence of macro-economic factors on the price of gold. *Procedia Computer Science*, 17, 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.095>
- London Stock Exchange plc. (2006). AIM Rules - Guidance for Mining and Oil & Gas Companies. Stock Exchange AIM Notice. London, United Kingdom. Retrieved from <http://www.londonstockexchange.com/companies-and-advisors/aim/advisers/rules/guidance-note.pdf>



- Machacek, E., & Fold, N. (2014). Alternative value chains for rare earths: The anglo-deposit developers. *Resources Policy*, 42, 53–64.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.09.003>
- Mannfolk, P., Wirestam, R., Nilsson, M., Ståhlberg, F., & Olsrud, J. (2010). Dimensionality reduction of fMRI time series data using locally linear embedding. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, 23(5–6), 327–338. <https://doi.org/10.1007/s10334-010-0204-0>
- Martin-Izard, A., Arias, D., Arias, M., Gumiel, P., Sanderson, D. J., Castañon, C., ... Sanchez, J. (2015). A new 3D geological model and interpretation of structural evolution of the world-class Rio Tinto VMS deposit, Iberian Pyrite Belt (Spain). *Ore Geology Reviews*, 71, 457–476.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.006>
- Martin-Izard, A., Arias, D., Arias, M., Gumiel, P., Sanderson, D. J., Castañon, C., & Sanchez, J. (2016). Ore deposit types and tectonic evolution of the Iberian Pyrite Belt: From transtensional basins and magmatism to transpression and inversion tectonics. *Ore Geology Reviews*, 79(May), 254–267.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.05.011>
- Martínez, C. A., & Velásquez, J. D. (2015). Conceptual Developments in Genetic Programming for Time Series Forecasting, 13(8), 2728–2733.
<https://doi.org/doi:10.1109/TLA.2015.7332156>
- Massari, S., & Ruberti, M. (2013). Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, 38(1), 36–43.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.07.001>
- Matyjaszek, M., Riesgo Fernández, P., Krzemień, A., Wodarski, K., & Fidalgo Valverde, G. (2019). Forecasting coking coal prices by means of ARIMA models and neural networks, considering the transgenic time series theory. *Resources Policy*, 61(December 2018), 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.02.017>
- Matyjaszek, M., Wodarski, K., Krzemień, A., Escanciano García-Miranda, C., & Suárez Sánchez, A. (2018). Coking coal mining investment: Boosting European Union's raw materials initiative. *Resources Policy*, 57(December 2017), 88–97.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.01.012>
- McLellan, B. C., Corder, G. D., Golev, A., & Ali, S. H. (2014). Sustainability of the Rare Earths Industry. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 280–287.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.035>
- Mudd, G. M., Jowitt, S. M., & Werner, T. T. (2016). The world's by-product and critical metal resources part I: Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism. *Ore Geology Reviews*.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.05.001>
- NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems and U.S./Japan ASTER Science Team. (2009). ASTER Global Digital Elevation Model [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.002>
- Newell, A. (2015). Processing in Feasibility Studies, (November). NI 43-101. (2011). Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators. Retrieved from http://web.cim.org/standards/documents/Block484_Doc111.pdf
- Nikolaou, A., Gutiérrez, P. A., Durán, A., Dicaire, I., Fernández-Navarro, F., & Hervás-Martínez, C. (2014). Detection of early warning signals in paleoclimate data using a genetic time series segmentation algorithm. *Climate Dynamics*, 44(7–8), 1919–1933. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2405-0>

- Noble, A. (2018). Technical Report on the Mineral Resources and Reserves of the Touro Copper Project. Ore Reserves Engineering, Lakewood, CO, USA. Retrieved from https://ww4.fscwire.com/sites/default/files/news_release_pdf/atalaya05212018.pdf
- Ordóñez Galán, C., Sánchez Lasheras, F., de Cos Juez, F. J., & Bernardo Sánchez, A. (2017). Missing data imputation of questionnaires by means of genetic algorithms with different fitness functions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 311(2), 704–717. <https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.cam.2016.08.012>
- PERC Reporting Standard. (2017). Pan-European Standard for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Reserves. Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee. Bruxelles, Belgium. Retrieved from http://www.vmine.net/PERC/documents/PERC_REPORTING_STANDARD_2017.pdf
- PwC. (2018a). Greenland: Corporate - Deductions. Retrieved November 30, 2018, from <http://taxsummaries.pwc.com/ID/Greenland-Corporate-Deductions>
- PwC. (2018b). Greenland: Corporate - Taxes on corporate income. Retrieved November 30, 2018, from <http://taxsummaries.pwc.com/ID/Greenland-Corporate-Taxes-on-corporate-income>
- PwC. (2019a). Czech Republic: Corporate - Deductions. Retrieved from <http://taxsummaries.pwc.com/ID/Czech-Republic-Corporate-Deductions>
- PwC. (2019b). Czech Republic: Corporate - Taxes on corporate income. Retrieved from <http://taxsummaries.pwc.com/ID/Czech-Republic-Corporate-Taxes-on-corporate-income>
- R Core Team. (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.r-project.org/>
- Rare Element Resources Ltd. (2014). Bear Lodge Project. Canadian NI 43-101 Pre-Feasibility Study Report on the Reserves and Development of the Bull Hill Mine, Wyoming. Roche Engineering Inc. Retrieved from http://www.rareelementresources.com/App_Themes/NI43-101PreFeasibilityStudyReport/HTML/#1
- Rendu, J.-M. (2014). An Introduction to Cut-Off Grade Estimation (2nd Revise). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Englewood, Colorado.
- Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Manzanedo del Campo, M. Á., Escanciano García-Miranda, C., & Sánchez Lasheras, F. (2018). Rare earth elements price forecasting by means of transgenic time series developed with ARIMA models. *Resources Policy*, (February). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.06.003>
- Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Manzanedo del Campo, M. Á., Menéndez Álvarez, M., & Gent, M. R. (2017). Rare earth elements mining investment: It is not all about China. *Resources Policy*, 53(April), 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.004>
- Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Sáiz Bárcena, L. C., Diego Álvarez, I., & Castañón Fernández, C. (2019a). Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding on further project developments. *Resources Policy*, 64(August). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101525>
- Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Sáiz Bárcena, L. C., Diego Álvarez, I., & Castañón Fernández, C. (2019b). Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding



- on further project developments. *Resources Policy*, 64(November).
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101525>
- Roberts, M. C. (2009). Duration and characteristics of metal price cycles. *Resources Policy*, 34(3), 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.02.001>
- Sánchez Lasheras, F., de Cos Juez, F. J., Suárez Sánchez, A., Krzemień, A., & Riesgo Fernández, P. (2015). Forecasting the COMEX copper spot price by means of neural networks and ARIMA models. *Resources Policy*, 45, 37–43.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.03.004>
- Sato, A. H. (2013). A comprehensive analysis of time series segmentation on Japanese stock prices. *Procedia Computer Science*, 24, 307–314.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.10.055>
- Shahabi, C., Chung, S., & Safar, M. (2001). A wavelet-based approach to improve the efficiency of multi-level surprise mining. *Ssdbm*. Retrieved from <http://infolab.usc.edu/DocsDemos/pakdd01.pdf>
- Si, Y.-W., & Yin, J. (2013). OBST-based segmentation approach to financial time series. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(10), 2581–2596.
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.08.015>
- Sismeiro, C., Mizik, N., & Bucklin, R. E. (2012). Modeling coexisting business scenarios with time-series panel data: A dynamics-based segmentation approach. *International Journal of Research in Marketing*, 29(2), 134–147.
<https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2011.08.005>
- Sober, E. (2002). Instrumentalism, parsimony, and the akaike framework. *Philosophy of Science*, 69, 112–123.
- Steffen, O. K. H., Contreras, L. F., Terbrugge, P. J., & Venter, J. (2008). A risk evaluation approach for pit slope design. *Proceedings 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, ARMA 08-23*, 1–18.
- Sterba, J., Krzemień, A., Fidalgo Valverde, G., Riesgo Fernández, P., & Escanciano García-Miranda, C. (2019). Lithium mining: Accelerating the transition to sustainable energy. *Resources Policy*, 62(April), 416–426.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.05.002>
- Suárez Sánchez, A., Riesgo Fernández, P., Sánchez Lasheras, F., De Cos Juez, F. J., & García Nieto, P. J. (2011). Prediction of work-related accidents according to working conditions using support vector machines, 218, 3539–3552.
<https://doi.org/10.1016/j.amc.2011.08.100>
- Suárez Sánchez, Ana, Krzemień, A., Riesgo Fernández, P., Iglesias Rodríguez, F. J., Sánchez Lasheras, F., & de Cos Juez, F. J. (2015). Investment in new tungsten mining projects. *Resources Policy*, 46, 177–190.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.10.003>
- Sugiura, N. (1978). Further analysis of the data by Akaike's information criterion of model fitting. *Suri-Kagaku (Mathematic Science)*, 153, 12–18.
<https://doi.org/10.1080/03610927808827599>
- Sulla-Menashe, D., Kennedy, R. E., Yang, Z., Braaten, J., Krankina, O. N., & Friedl, M. A. (2014). Detecting forest disturbance in the Pacific Northwest from MODIS time series using temporal segmentation. *Remote Sensing of Environment*, 151, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.042>
- Tseng, V. S., Chen, C. H., Huang, P. C., & Hong, T. P. (2008). A cluster-based genetic approach for segmentation of time series and pattern discovery. *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2008*, 1949–1953.
<https://doi.org/10.1109/CEC.2008.4631055>

- Tseng, V. S., Chen, C. H., Huang, P. C., & Hong, T. P. (2009). Cluster-based genetic segmentation of time series with DWT. *Pattern Recognition Letters*, 30(13), 1190–1197. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.05.013>
- U.S. Department of Energy. (2011). *Critical Materials Strategy 2011*. Energy, 191. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf
- Vaněk, M., Bora, P., Maruszewska, E. W., & Kašparková, A. (2017). Benchmarking of mining companies extracting hard coal in the Upper Silesian Coal Basin. *Resources Policy*, 53(March), 378–383. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.07.010>
- Wan, Y., Gong, X., & Si, Y. W. (2016). Effect of segmentation on financial time series pattern matching. *Applied Soft Computing Journal*, 38, 346–359. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.012>
- Wang, Q., & Megalooikonomou, V. (2008). A dimensionality reduction technique for efficient time series similarity analysis. *Information Systems*, 33(1), 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.is.2007.07.002>
- Wang, Q., Megalooikonomou, V., & Faloutsos, C. (2010). Time series analysis with multiple resolutions. *Information Systems*, 35(1), 56–74. <https://doi.org/10.1016/j.is.2009.03.006>
- Williams, P. (1983). The genesis and metamorphism of the Arinteiro-Bama Cu deposits, Santiago de Compostela, northwestern Spain. *Economic Geology*, 78(8), 1689–1700. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.8.1689>
- World Bank. (2019a). Copper (LME), grade A, minimum 99.9935% purity, cathodes and wire bar shapes, settlement price in \$/t. *Commodity Price Data (The Pink Sheet)*. Bloomberg; Engineering and Mining Journal; Platts Metals Week; Thomson Reuters Datastream; World Bank. Retrieved from <http://pubdocs.worldbank.org/en/561011486076393416/CMO-Historical-Data-Monthly.xlsx>
- World Bank. (2019b). Gold (UK), 99.5% fine, London afternoon fixing, average of daily rates in \$/oz t (Troy ounce). *Commodity Price Data (The Pink Sheet)*. Bloomberg; Kitco.com; International Monetary Fund, International Financial Statistics; London Bullion Market; Metals Week; Platts Metals Week; Shearson Lehman Brothers, Metal Market Weekly Review; Thomson Reuters Dat. Retrieved from <http://pubdocs.worldbank.org/en/561011486076393416/CMO-Historical-Data-Monthly.xlsx>
- World Bank. (2019c). Zinc (LME), high grade, minimum 99.95% purity, settlement price beginning April 1990; previously special high grade, minimum 99.995%, cash prices in \$/t. *Commodity Price Data (The Pink Sheet)*. Bloomberg; Engineering and Mining Journal; Platts Metals Week; Thomson Reuters Datastream; World Bank. Retrieved from <http://pubdocs.worldbank.org/en/561011486076393416/CMO-Historical-Data-Monthly.xlsx>
- Wu, J. L., & Chang, P.-C. (2012). A Trend-Based Segmentation Method and the Support Vector Regression for Financial Time Series Forecasting. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2012/615152>
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2005). *Rock Slope Engineering*, Civil and Mining (4th ed.). London and New York: Spon Press, Taylor and Francis Group.
- Yan, L., & Roy, D. P. (2015). Improved time series land cover classification by missing-observation-adaptive nonlinear dimensionality reduction. *Remote Sensing of Environment*, 158, 478–491. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.024>



- Yang, H., & Hu Man Zhou Li, X. (2016). Wavelet neural network with improved genetic algorithm for traffic flow time series prediction. *Optik*, 127, 8103–8110. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.06.017>
- Yang, L., Zhang, J., Wu, X., Zhang, Y., & Li, J. (2015). A chaotic time series prediction model for speech signal encoding based on genetic programming. *Applied Soft Computing*, 38, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.003>
- Yang, Q., Wu, X., Domingos, P., Elkan, C., Gehrke, J., Han, J., ... Wah, B. W. (2006). 10 Challenging Problems in Data Mining Research. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 5(4), 597–604. <https://doi.org/10.1142/S0219622006002258>
- Yin, Y., Shang, P., & Xia, J. (2015). Compositional segmentation of time series in the financial markets. *Applied Mathematics and Computation*, 268, 399–412. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.06.061>
- Zarinbal, M., Fazel Zarandi, M. H., & Turksen, I. B. (2014). Interval Type-2 Relative Entropy Fuzzy C-Means clustering. *Information Sciences*, 272(4), 49–72. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.066>
- Zheng, H. Y., Wang, L., & Zheng, X. L. (2015). Teaching–learning-based optimization algorithm for multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Soft Computing*, 20(10), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00500>