



SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE ESTRATEGIAS EN EL DESARROLLO DEL SECTOR MINERO 2014 - 2032

INFORME FINAL



Diciembre de 2014

**SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE
ESTRATEGIAS EN EL DESARROLLO DEL SECTOR MINERO
2014 – 2032**

INFORME FINAL

FACULTAD DE MINAS, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MEDELLÍN



UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA – UPME



Diciembre de 2014

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME

Ángela Cadena Monroy
Directora General

Sara Catalina Cárdenas Castillo
Subdirectora de Minería

Equipo Subdirección de Minería

Lady Castellanos Niño
Luz Mireya Gómez Ríos

Universidad Nacional De Colombia

Santiago Arango Aramburo
Ricardo Smith Quintero
Yris Olaya Morales
Gloria Patricia Jaramillo Álvarez
Carlos Adrián Saldarriaga Isaza
Oscar Jaime Restrepo Baena

Jessica Arias Gaviria
Sebastián Bernal García
Pablo Esteban Londoño
Juan Felipe Parra Rodas
Carlos Guillermo Perea

Asesor Internacional: Erik Larsen, Universidad de Lugano

Diciembre de 2014

Contenido

1.	Introducción.....	12
	Objetivos	16
	Objetivo general	16
	Objetivos específicos.....	16
2.	Metodología.....	17
2.1	Modelos de planeación de recursos minerales	17
2.2	Selección de metodología.....	19
2.3	Dinámica de sistemas (DS)	21
2.3.1	Articulación del problema	22
2.3.2	Formulación de hipótesis dinámica	22
2.3.3	Formulación del modelo matemático	22
2.3.4	Validación	22
2.3.5	Simulación de políticas y estrategias.....	23
2.4	Alcance del modelo	23
2.5	El problema de planeación minera en el largo plazo.....	23
2.6	Formulación del modelo.....	24
2.6.1	Sesiones de capacitaciones en dinámica de sistemas	24
2.6.2	Sesiones de modelamiento	26
2.7	Validación del modelo.....	27
2.7.1	Pruebas directas de estructura:	27
2.7.2	Pruebas de estructura orientadas al comportamiento:	27
2.7.3	Pruebas directas de comportamiento:	28
3.	Evolución del sector minero.....	29
3.1	Datos históricos de minería en Colombia.....	29
3.1.1	Producción y precios	29
3.1.2	Exportaciones	31
3.1.3	Renta minera.....	33

3.1.4	Otra información	35
3.2	Tendencias mundiales	37
3.2.1	Demanda.....	37
3.2.2	Oferta.....	38
3.2.3	Costos	39
3.2.4	Riesgos	39
4.	El problema de la planeación minera en el largo plazo	41
4.1	Identificación del problema.....	41
4.1.1	Fortalezas y debilidades del sector: Estructuración del problema.....	41
4.1.2	Resultados deseados o ideales para el sector minero en el largo plazo	43
4.1.3	Información que se quiere conocer en el futuro:	44
4.1.4	Escenario optimista para el sector minero:.....	45
4.2	Delimitación del problema	45
4.2.1	Variables que afectan el problema	45
4.2.2	Discusión de detalles del modelo	48
5.	Modelo del sector minero en Colombia	49
5.1	Diagrama causal del sector minero en Colombia	49
5.1.1	Estructura general.....	50
5.1.2	Módulo de producción.....	52
5.1.3	Módulos social y ambiental.....	53
5.1.4	Módulo macroeconómico – Atractividad	56
5.1.5	Hipótesis dinámica consolidada	56
5.2	Módulo de producción.....	58
5.3	Marco regulatorio y político.....	70
5.4	Módulo financiero	74
5.4.1	Costos	74
5.4.2	Decisiones de inversión.....	75
5.4.3	Ganancias	76
5.5	Módulo ambiental.....	82
5.6	Módulo social.....	92
5.7	Módulo macroeconómico.....	98
6.	Validación del modelo.....	100

6.1	Validación de la estructura	101
6.2	Validación de comportamiento y calibración.....	102
6.3	Análisis de sensibilidad.....	104
6.3.1	Variación en los precios	105
6.3.2	Variación en los valores iniciales de reservas	106
6.3.3	Variación en la demanda interna	107
7.	Escenarios de simulación	109
7.1	Formulación de los escenarios.....	109
7.1.1	Precio.....	109
7.1.2	Desarrollo tecnológico	110
7.1.3	Infraestructura	111
7.1.4	Seguridad.....	113
7.1.5	Estabilidad jurídica.....	114
7.2	Resultados esperados para el sector minero	122
7.2.1	Escenarios a 2032 para el Carbón	122
7.2.2	Escenarios a 2032 para el Oro	133
7.2.3	Escenarios a 2032 para Caliza	141
8.	Estrategias para el sector minero	149
8.1	Mejoras en institucionalidad.....	150
8.2	Competitividad	155
8.3	Mejoras en conocimiento geológico.....	157
8.4	Incentivos tributarios	161
8.5	Mejoras en planes de formalización y legalización.....	169
8.6	Encadenamientos productivos	172
8.7	Solución integral.....	178
9.	Conclusiones	184
	Trabajo futuro.....	188
	Referencias	190
	Anexo 1 - Taller de identificación de problema.....	197
	Anexo 2 – Capacitaciones en Dinámica de Sistemas y sesiones de modelamiento	208
	Anexo 3 – Validación del modelo	214

Lista de Figuras

Figura 1 – Aproximaciones de modelamiento.....	20
Figura 2 – Producción de carbón en Colombia.	30
Figura 3 – Precio internacional de carbón.	30
Figura 4 – Producción de oro en Colombia.....	31
Figura 5 – Precio internacional de oro.	31
Figura 6 – Producción de caliza.	31
Figura 7 – Exportaciones anuales de carbón.	32
Figura 8 – Exportaciones anuales de oro.....	32
Figura 9 –Exportaciones anuales de materiales de construcción	33
Figura 10 – Ingresos anuales y precio interno de liquidación de regalías de carbón.	34
Figura 11 – Ingresos anuales y precio de liquidación de regalías de oro.	35
Figura 12 –Empleos generados por el sector minero y participación en empleos nacionales.....	35
Figura 13 –Reservas medidas de Carbón.	36
Figura 14 –Inversión extranjera directa (IED) en minas y canteras.....	37
Figura 15 – Diagrama causa efecto del problema de la planeación minera en el largo plazo en Colombia	43
Figura 16 – Diagrama de bloques de modelo del sector minero.	50
Figura 17 – Diagrama causal general del sector minero.	51
Figura 18 – Diagrama causal del módulo de producción.	52
Figura 19 – Diagrama causal de los módulos social, ambiental, y macroeconómico.	54
Figura 20 – Detalle de causalidad en conflicto social.	55
Figura 21 – Diagrama causal detallado del sector minero.....	57
Figura 22 – Clasificación de recursos en el presente estudio.	58
Figura 23 – Diagrama de flujos y niveles del módulo de producción.	60
Figura 24 – Detalle de diagramas de producción de carbón.....	61
Figura 25 – Detalle de diagrama de producción formal de oro.	61
Figura 26 – Detalle de diagrama de producción informal de oro.	62
Figura 27 – Detalle de diagrama de producción informal de caliza.	62
Figura 28– Diagrama de flujos y niveles para el marco regulatorio.	71
Figura 29– Diagrama de flujos y niveles de costos.	74

Figura 30– Diagrama de flujos y niveles de decisiones de inversión.....	76
Figura 31 – Diagrama de flujos y niveles de ganancias.	77
Figura 32 – Diagrama de flujos y niveles del módulo ambiental para carbón.	82
Figura 33 – Diagrama de flujos y niveles del módulo ambiental para oro.....	83
Figura 34 – Diagrama de flujos y niveles del módulo social para carbón.....	93
Figura 35 – Diagrama de flujos y niveles de atractividad de carbón.	98
Figura 36 – Proceso de validación propuesto por Barlas (1996).....	100
Figura 37 – Ajuste obtenido en la calibración del modelo.	103
Figura 38 - Análisis de sensibilidad de la producción con respecto al precio.....	106
Figura 39 - Análisis de sensibilidad producción con respecto a valor inicial de reservas.....	107
Figura 40 - Análisis de sensibilidad de producción con respecto a la demanda interna.	108
Figura 41. Estrategias de mejora en la capacidad de fiscalización.....	150
Figura 42 – Resultados de aumentar la fiscalización hasta el 100% para el escenario “los años maravillosos”.	153
Figura 43 – Resultados de aumentar la fiscalización hasta el 100% para el escenario “unas de cal y otras de arena”.	154
Figura 44 – Resultados de aumentar la fiscalización hasta el 100% para el escenario “sin el pan y sin el queso”.....	154
Figura 45 – Resultados de mejoras en competitividad para el escenario “unas de cal y otras de arena”. .	156
Figura 46 – Resultados de mejoras en competitividad para el escenario “sin el pan y sin el queso”.....	157
Figura 47. Estrategias de mejoras en el conocimiento geológico del carbón térmico.....	157
Figura 48. Estrategias de mejoras en el conocimiento geológico del carbón metalúrgico.....	157
Figura 49. Estrategias de mejoras en el conocimiento geológico del oro	158
Figura 50. Estrategias de mejoras en el conocimiento geológico de las caliza.....	158
Figura 51 – Resultados de mejoras en conocimiento geológico para reservas probables en el escenario “los años maravillosos”.	160
Figura 52 – Resultados de mejoras en conocimiento geológico para reservas probables en el escenario “unas de cal y otras de arena”.....	161
Figura 53 – Resultados de mejoras en conocimiento geológico para reservas probables en el escenario “sin el pan ni el queso”.	161
Figura 54 – Resultados de disminución en regalías para el escenario “los años maravillosos”.....	163
Figura 55 – Resultados de disminución en regalías para el escenario “unas de cal y otras de arena”.	164
Figura 56 – Resultados de disminución en regalías para el escenario “sin el pan y sin el queso”.	164

Figura 57 – Resultados de disminuir el impuesto de renta en el escenario “los años maravillosos”	166
Figura 58 – Resultados de disminuir el impuesto de renta en el escenario “unas de cal y otras de arena”	167
Figura 59 – Resultados de disminuir el impuesto de renta en el escenario “sin el pan y sin el queso”	168
Figura 60. Estrategias en formalización y legalización.....	170
Figura 61 – Resultados de mejoras en formalización para escenario “los años maravillosos”	170
Figura 62 – Resultados de mejoras en formalización para escenario “unas de cal y otras de arena”	171
Figura 63 – Resultados de mejoras en formalización para escenario “sin el pan y sin el queso”	171
Figura 64 - Demanda interna de carbón térmico con la entrada de tres nuevas centrales térmicas	173
Figura 65. Demanda interna de carbón metalúrgico con la ejecución del proyecto “Ferrocarril de Carare”	174
Figura 66. Demanda interna de carbón metalúrgico con la construcción de una nueva planta siderúrgica	174
Figura 67. Demanda interna de oro por inserción de industria joyera	174
Figura 68 – Resultados de encadenamientos productivos en el escenario “los años maravillosos”	176
Figura 69 – Resultados de encadenamientos productivos en el escenario “unas de cal y otras de arena”	176
Figura 70 – Resultados de encadenamientos productivos en el escenario “sin el pan y sin el queso”	177
Figura 71 – Nuevos empleos y valor agregado de encadenamientos productivos.	178
Figura 72 – Resultados de solución integral en el escenario “los años maravillosos”.	181
Figura 73 – Resultados de solución integral en el escenario “unas de cal y otras de arena”.	182
Figura 74 – Resultados de solución integral en el escenario “sin el pan y sin el queso”.	183

Lista de Tablas

Tabla 1 – Escenarios Mineros para Colombia a 2032.....	13
Tabla 2 – Resumen de modelos revisados para el estudio del sector minero.....	17
Tabla 3 – Características necesarias en un modelo del sector minero.....	21
Tabla 4 – Metodología de taller 1: El problema de la planeación minera en el largo plazo	24
Tabla 5 – Metodología de capacitaciones en dinámica de sistemas.....	25
Tabla 6 – Metodología de sesiones de modelamiento 1 y 2.....	26
Tabla 7 –Porcentajes para el pago de Regalías Mineras. Ley 756 de 2002.	34
Tabla 8– Reservas de diferentes minerales.	36
Tabla 9 – Fortalezas y debilidades del sector minero en Colombia	41
Tabla 10 – Resultados optimistas y realistas para el sector minero en el largo plazo	45
Tabla 11 – Variables propuestas en taller 1.....	45
Tabla 12 – Variables definitivas a incluir en el modelo	46
Tabla 13 – Variables y ecuaciones del módulo de producción.	63
Tabla 14 – Variables y ecuaciones del marco regulatorio.....	72
Tabla 15 – Variables y ecuaciones del módulo financiero.....	78
Tabla 16 – Variables y ecuaciones del módulo ambiental.	85
Tabla 17 – Variables y ecuaciones del módulo social.....	94
Tabla 18 – Variables y ecuaciones del módulo macroeconómico.....	99
Tabla 19 – Metodología de taller 2: Validación de la estructura del modelo.....	101
Tabla 20 – Parámetros del análisis de sensibilidad.	104
Tabla 21 – Variables que intervienen en los escenarios de simulación.....	116
Tabla 22 – Escenarios de simulación (UPME & UNAL, 2013).	122
Tabla 23 – Resultados de escenarios para carbón	125
Tabla 24 – Resultados de escenarios para oro.....	134
Tabla 25 – Resultados de escenarios para caliza.....	142
Tabla 26 – Resultados del modelo para cada escenario.	148
Tabla 27 – Estrategias propuestas para el sector minero.....	149
Tabla 28 – Efecto de mejoras en institucionalidad sobre los escenarios.....	151
Tabla 29 – Efecto de mejoras en competitividad sobre los escenarios.	155

Tabla 30 – Efecto de mejoras en conocimiento geológico sobre los escenarios.	158
Tabla 31- Impuestos al sector minero	162
Tabla 32 – Efecto de regalías sobre escenarios	165
Tabla 33 – Efecto de impuesto de renta sobre escenarios.	169
Tabla 34 – Efecto de formalización sobre los escenarios.....	172
Tabla 35- Promedio estimado de consumo de carbón térmico de tres nuevas centrales térmicas	173
Tabla 36 – Efecto de encadenamientos productivos sobre los escenarios.	175
Tabla 37 – Resultados de solución integral en cada escenario.....	179

1. Introducción

La explotación minera ha sido y será uno de los motores más importantes de la economía colombiana y políticas gubernamentales recientes la han enmarcado prioritariamente para el futuro bajo el sello de la “Locomotora Minera”. Sin embargo, la materialización de esta visión no depende solamente de la intencionalidad y de las políticas estatales sino de la compleja interacción entre un gran número de agentes: empresas mineras que explotan a nivel mundial en los países de mayor atractividad, una sociedad heterogénea que no sólo recibe los beneficios económicos y tecnológicos de la explotación minera sino que rechaza los perjuicios ambientales que puedan generarse por dicha explotación y un mundo exterior que demanda e impone precios de compra. Todo esto enmarcado en una altísima incertidumbre en el largo plazo, pues las decisiones que se tomen ahora pueden tener consecuencias a 20 años o más.

En 2013, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), en conjunto con la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) realizó un estudio prospectivo (Escenarios Mineros para Colombia UPME-UNAL, 2013), donde, a partir de un gran número de análisis de información secundaria, talleres y entrevistas a expertos, identificó las variables más importantes e inciertas que podrían influir en el futuro del sector minero en Colombia a largo plazo (2013 a 2032). Las macro-variables inciertas identificadas fueron: renta minera, la estructura de lo público, corrupción e ilegalidad, sostenibilidad ambiental y el comportamiento de las comunidades. En este estudio se formuló, además, tres escenarios futuros prospectivos fundamentales, a partir de la combinación de posibles resultados de esas incertidumbres. Estos escenarios se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1 – Escenarios Mineros para Colombia a 2032

ESCENARIO 1
La sólida estructura institucional Colombiana, junto con el alto control social, ha permitido que la minería se desarrolle de forma rentable, con buenas prácticas ambientales y responsabilidad social empresarial. La minería contribuye al desarrollo del país y es bien vista por comunidades locales cuya calidad de vida ha aumentado gracias a ésta.
ESCENARIO 2
La minería es una actividad rentable en Colombia pero, por la falta de control social y las debilidades institucionales, el control ambiental es el mínimo exigido y la responsabilidad social de las empresas responde sólo a sus intereses. Aunque la producción y los ingresos mineros han aumentado, no se observa un impacto positivo de la minería en el desarrollo nacional ni de las comunidades locales.
ESCENARIO 3
La debilidad institucional y la falta de control social impiden fomentar una minería rentable económicamente y responsable ambiental y socialmente, especialmente en un ambiente de precios bajos. En consecuencia, hay pasivos ambientales sin mitigar y conflictos por uso del suelo. La minería no es un factor de desarrollo y tiene mala imagen en el país.

En dicho estudio prospectivo se propusieron, además, de forma macro y cualitativa, diferentes estrategias gubernamentales que podrían afectar positivamente la evolución del sector minero y enfrentarse exitosamente a las diferentes incertidumbres. Estas estrategias incluyen, entre otras:

- Desarrollo de conocimiento detallado del subsuelo.
- Desarrollo de capital humano capacitado.
- Impulsar encadenamientos productivos.
- Fortalecer la institucionalidad con políticas de transparencia, esquema de regulación, etc.
- Implementar programas de formalización minera.
- Cuantificar efectos ambientales y sociales e incluirlos dentro de estudios de costo/beneficio

Aunque el estudio prospectivo permitió una visión más clara del futuro del sector, se requirió de un esfuerzo adicional para cuantificar y definir de manera más detallada las interrelaciones dinámicas entre todas las variables (económicas, ambientales, políticas, sociales y tecnológicas) con el fin de valorar los impactos de las estrategias que el gobierno pudiera tomar: identificar las variables críticas para el éxito y el logro de las metas establecidas y las principales barreras al crecimiento del sector y las posibles soluciones para reducirlas.

La simulación es una herramienta computacional que permitió, en este nuevo proyecto “Simulación y Evaluación del Impacto de Estrategias en el Desarrollo del Sector Minero”, el alcance de este objetivo y

como se justifica más adelante, específicamente un modelo de Dinámica de Sistemas (DS) permitió modelar la interacción dinámica en el tiempo (pasado y futuro) entre variables físicas y de comportamiento de los agentes implicados y evaluar, de forma sistémica, las diferentes estrategias propuestas. DS permitió, además, plantear de forma independiente cada uno de los escenarios prospectivos formulados e identificar qué tan exitosa sería cada estrategia ante resultados específicos de las incertidumbres. Las mejores estrategias son las más robustas, esto es, las más exitosas en la mayoría de los escenarios.

Sin embargo, es menester aclarar que el modelo analiza el sector minero nacional de forma agregada, no se modela cada una de las unidades de producción de forma individual, sino que se busca entender el comportamiento general del sector minero. El modelo no realiza predicciones pero si tiene la posibilidad de responder a las preguntas del tipo ¿Qué pasaría si...?. De este modo permite entendimiento y aprendizaje; experimentar sobre futuros del sector bajo escenarios específicos y analizar las posibilidades. A partir de este nuevo entendimiento se podría, en el futuro, modelar a menor escala unidades específicas para responder a preguntas más detalladas.

A partir del trabajo conjunto entre UNAL y UPME se identificaron 3 minerales prioritarios a modelar: oro, carbón y caliza, por su mayor impacto en la economía del país: cada uno de ellos se incorporó mediante un sub-modelo que sigue una patrón estándar (diseñado para cualquier mineral pero flexible a incorporar excepciones) que se vinculan a partir de variables transversales como atractividad país o institucionalidad. El nivel de agregación y las relaciones entre variables, se definieron de manera conjunta entre el equipo UNAL y el equipo de la UPME. Este esquema de trabajo enriquece el modelo y permite además, que la UPME esté en capacidad de, en el futuro, modelar la dinámica de la explotación de otros minerales, modificar, actualizar o complementar el modelo y evaluar otras estrategias. Para ello, el proyecto garantizó la capacitación en DS y en el uso del modelo a personal de la UPME, apostando a la sostenibilidad del avance realizado en este proyecto.

El modelo se alimentó además, de las opiniones críticas de expertos en varios talleres, de datos proporcionados por la UPME y de algunos supuestos (con criterios de expertos) sobre algunas de las variables de las que no se contaba con información. Toda esta información permitió modelar el pasado y hacer proyecciones para el comportamiento futuro de las variables.

El modelo facilitó entender los diferentes ciclos en precios, demanda y oferta que se han dado en el pasado y emular su comportamiento para el futuro (a 2032). Permitted entender cómo, por ejemplo, la inversión en las regiones locales o en mejorar a tecnología para evitar mayores daños ambientales podría afectar la

aceptabilidad social o disminuir el conflicto social y aumentar así la posibilidad de que empresas multinacionales mineras apuesten por el país.

Específicamente, para cada mineral se modelaron seis bloques en los que se agrupan las variables: bloque de producción, que incluye las reservas y la producción informal; bloque financiero, que incluye los criterios de viabilidad económica de una inversión; bloque social, que considera la percepción de la sociedad y conflicto con las comunidades; bloque ambiental, que considera los impactos sobre el medio ambiente; bloque macroeconómico que considera variables como atractividad país, precios de los minerales, regulaciones e impuestos, etc.; y bloque de encadenamientos productivos, que considera otras industrias que pueden jalonar la demanda interna (siderúrgicas, plantas térmicas, etc.) e industrias que den valor agregado al mineral (joyerías).

Con el modelo se puede evaluar el comportamiento de variables como producción, reservas, renta minera estatal, conflicto social, atractividad del mineral, entre otras, bajo diferentes escenarios. Además, se evaluaron estrategias para impulsar el sector minero. Entre estas estrategias se observó que el desarrollo de encadenamientos productivos puede llevar no solo a un aumento de la producción, si no a disminuir los conflictos sociales gracias a la generación de empleo y valor agregado de las industrias.

Como trabajo futuro, se perfila la inclusión de otros minerales estratégicos para el país como el níquel, hierro o minerales industriales, la inclusión de otras incertidumbres de altísimo impacto, como por ejemplo, un caída drástica de la demanda mundial o de los precios, o un pacto comercial mundial que incluya o que excluya el país y el desarrollo de modelos de simulación a una menor escala que permitan entender procesos más detallados a nivel regional, local o de empresa.

En este documento se presenta el informe del proyecto en el siguiente orden: en el numeral 2 se presenta la metodología que se siguió, en el numeral 3 se presentan los principales datos recolectados y el comportamiento pasado y presente del sector, en el numeral 4, la expectativas a largo plazo y los diagramas causales identificados en los talleres, en los numerales 5 y 6 se presentan la modelación matemática con detalle y su posterior validación. Los capítulos 7 y 8 presentan las simulaciones de escenarios y estrategias para el sector minero; finalmente, las conclusiones y trabajo futuro se presentan en el numeral 9.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un esquema de modelamiento que simule los escenarios construidos para el sector minero colombiano, partiendo de las variables inciertas que los definen, permitiendo generar información sobre el comportamiento del sector minero en cada uno de los escenarios, y establecer un esquema de evaluación sistémico de las diferentes estrategias propuestas. Una vez desarrollados los modelos se podrá analizar la presencia de singularidades (inimaginables) en cada uno de los escenarios y ver cuál sería el impacto que tendrían dichas singularidades sobre el sector minero colombiano.

Objetivos específicos

- Identificar las variables críticas para el éxito de las decisiones en materia de política minera.
- Evaluar el comportamiento del sector minero bajo distintas condiciones iniciales, escenarios e intervenciones de política minera.
- Identificar combinaciones de decisiones que permitan alcanzar metas determinadas en materia de políticas mineras.
- Identificar tanto restricciones y cuellos de botella del desarrollo del sector minero en Colombia como posibles soluciones para reducir dichas restricciones.

2. Metodología

En este capítulo se presenta una revisión de modelos utilizados para el análisis de problemas y una propuesta metodológica en planeación de recursos naturales, principalmente en el sector minero complementado con elementos del sector energético. A partir de la revisión, se selecciona la metodología más apropiada para el desarrollo de los objetivos propuestos en el presente estudio. Una vez seleccionada la metodología, se presenta el desarrollo de la primera etapa del proceso de modelamiento, la identificación del problema.

2.1 Modelos de planeación de recursos minerales

La planeación y evaluación de decisiones y políticas de aprovechamiento de recursos mineros se apoyan en el uso de modelos. El alcance y tipo de modelos depende del problema estudiado. Mientras los problemas operativos mineros suelen abordarse con modelos que combinan criterios de ingeniería con criterios económicos y ambientales, la evaluación y diseño de políticas suele estudiarse con modelos económicos. Por ejemplo, Bjørndal et al. (2012) presenta una revisión de trabajos recientes en investigación de operaciones para el caso de la minería, en los que considera no solo modelos, sino también el desarrollo de algoritmos y aplicaciones.

Así mismo, algunos modelos observan la minería de forma agregada, mientras otros se enfocan en materiales y procesos específicos. En la Tabla 2 se muestra un resumen de modelos recientes del sector minero y sus aplicaciones.

Tabla 2 – Resumen de modelos revisados para el estudio del sector minero

Autor	Tipo de Modelo	Aplicación
(Northey, Mohr, Mudd, Weng, & Giurco, 2014)	Modelo Correlacional Empírico	Predicción de la reducción en la tasa de concentración de <i>mineral de cobre</i> en los principales países productores.
(H. Sverdrup, Koca, & Ragnarsdottir, 2014)	DS	Estudio sobre las reservas globales de cobre
(Glöser, Soulier, Espinoza, & Faulstich, 2013)	MFA	Modelo para el análisis de ecología industrial aplicado al flujo global de cobre.

Autor	Tipo de Modelo	Aplicación
(Mohr, Höök, Mudd, & Evans, 2011)	Logistic, Gompertz, modelos estáticos y dinámicos de oferta y demanda.	Proyección a largo plazo de la producción de carbón en Australia
(Pruyt, 2010)	DS*	Modelo genérico para la exploración y escasez de minerales y metales
(Chyong Chi, Nuttall, & Reiner, 2009)	DS	Análisis de políticas a largo plazo para la industria de gas natural en UK
(O'Regan & Moles, 2006)	DS	Estudio de la interacción entre factores ambientales y económicos en la industria de la minería
(Olaya & Dynner, 2005)	DS	Integración de modelos para estudiar el mercado del gas natural en Colombia.
(Spatari, Bertram, Gordon, Henderson, & Graedel, 2005)	DS	Estudio de flujos y niveles de cobre en Norte América
(Goonan, 2005)	MFA*	Flujo de material asociado a la fundición mundial de cobre
(O'Regan & Moles, 2004)	DS	Caso de estudio sobre atracción relativa en la exploración y desarrollo de minerales
(Murakami, Yamanoi, & Adachi, 2004)	MFA	Flujo de Materiales de Metales en Japón
(U . S . Department of the Interior; & U.S. Geological Survey, 2004)	MFA	Estudio de flujos para el reciclaje de commodities de metal en Estados Unidos
(O'Regan & Moles, 2001)	DS	Estudio de las decisiones de inversión en la industria de la minería sin contexto de decisiones ambientales
(Hyman & Andersen, 1998)	MFA	Modelo de flujo de energía para la industria del acero.
(Naill, 1977, 1992)	DS	Simulación del sistema agregado de Gas natural en US

Fuente: Elaboración propia.

* DS: Dinámica de Sistemas. MFA: Análisis de Flujo de Materiales.

A partir de la revisión anterior se observó que la planeación de recursos minerales se ha abordado principalmente desde tres diferentes metodologías de simulación: Modelos empíricos y econométricos (MEE), Análisis de Flujo de Materiales (MFA) y Dinámica de Sistemas (DS). Por un lado, está el uso de modelos empíricos y econométricos (MEE) con variables dependientes en el tiempo, con diferentes aplicaciones, como predecir la reducción de concentración de cobre (Northey et al., 2014). Por otro lado, está la metodología de Análisis de Flujo de Materiales utilizada principalmente para estudiar el ciclo de vida de un material (Glöser et al., 2013; Murakami et al., 2004, entre otros). Finalmente, la Dinámica de Sistemas

(DS) se ha utilizado para modelar el efecto de políticas ambientales en la exploración y explotación de un mineral (O'Regan & Moles, 2006).

Para el caso de la metodología de análisis de Flujo de Materiales (MFA), en su mayoría los modelos creados se encuentran enfocados en el estudio de eficiencia del proceso y en la transformación misma de los minerales, haciendo hincapié en aspectos como el reciclaje y en general en aspectos relacionados con el ambiente, sin considerar otros aspectos externos al proceso productivo o variables socioeconómicas.

En relación con los modelos de Dinámica de Sistemas, además de las aplicaciones en minería, se encuentran aplicaciones para la planeación energética a partir de diferentes combustibles como gas y carbón (Naill, 1977, 1992). Dichos modelos (COAL1 y COAL2) fueron elaborados para el gobierno de Estados Unidos y sirvieron de base para posteriores modelos a gran escala. En estudios más recientes, Chyong Chi et al. (2009) diseñaron un modelo sobre la industria del gas en Reino Unido, el cual se enfoca en la exploración del recurso, el sector de la producción y el consumo, además de incluir una proyección de demanda y sustitución de fuentes. De igual forma, Sverdrup et al. (2014) usan un modelo de DS para estudiar el estado global de las minas de cobre, simulando los suministros de mercado, las tasas de producción y los precios. Por otro lado, O'Regan & Moles (2001, 2004, 2006) desarrollan un modelo en DS para explicar la interdependencia de factores que afectan la atractividad de un país, dirigiendo sus esfuerzos a la planeación de políticas ambientales; el modelo se centra en tres bloques: La firma minera, el país y el mercado internacional de minerales. Pruyt (2010), en cambio, implementa un modelo dinámico general para estudiar la escasez de minerales y metales, e incluye además de los bloques de demanda y extracción, el proceso de reciclaje.

2.2 Selección de metodología

A partir de la revisión anterior, se concluye que existe una gran diversidad de metodologías y modelos aplicables a la planeación de largo plazo en el sector minero. La selección de metodología depende entonces del tipo de problema a estudiar y de su alcance. Específicamente, para el problema de la planeación minera en Colombia, se desea que el modelo tenga en cuenta las principales incertidumbres identificadas durante la construcción de los escenarios mineros: estructura de lo público, corrupción e ilegalidad, renta minera, sostenibilidad ambiental y el comportamiento de las comunidades.

En una revisión de modelos de cambio de uso del suelo, Agarwal et al. (2002) muestran que los modelos de simulación dinámica son los más apropiados para estudiar sistemas que involucren interacción entre factores físicos y humanos. Un modelo apropiado para estos sistemas debe cumplir con diferentes características:

- Debe permitir desagregar la escala del modelo al nivel que se requiera según los objetivos.
- Debe ser robusto en la complejidad temporal. Es decir, debe permitir un análisis para un horizonte de tiempo largo y tamaños de paso pequeños.
- Debe permitir el modelamiento de decisiones humanas.

Además, la metodología adecuada depende directamente de las características del problema y el objetivo del estudio. De esta forma, para el caso de problemas en los que la decisión es rutinaria, donde se presenta una situación recurrente de la cual sea posible encontrar regularidades inherentes a la misma y en general el problema se encuentre claramente identificado y enmarcado en teorías y modelos existentes, se suelen usar herramientas de automatización rutinaria y optimización en donde se desliga el proceso de decisiones de la presencia humana (Pidd, 1999). Por su parte, en el caso de problemas donde se incluyen factores como el desconocimiento del sistema y un nivel de confusión general, en los cuales no se tiene una solución analítica de forma directa y es indispensable la presencia humana en la toma de decisiones, es más apropiado herramientas de pensamiento o soporte a la decisión (Pidd, 1999). Estas herramientas de pensamiento, si bien representan la realidad, no son completamente rigurosas debido a la complejidad misma del sistema y se encuentran orientadas a generar discusión y entendimiento a través del planteamiento de cursos de acción que permiten obtener un conjunto de consecuencias futuras. En la Figura 1 se muestra un diagrama que explica el enfoque de modelamiento que se debe utilizar según el nivel de complejidad y los objetivos.

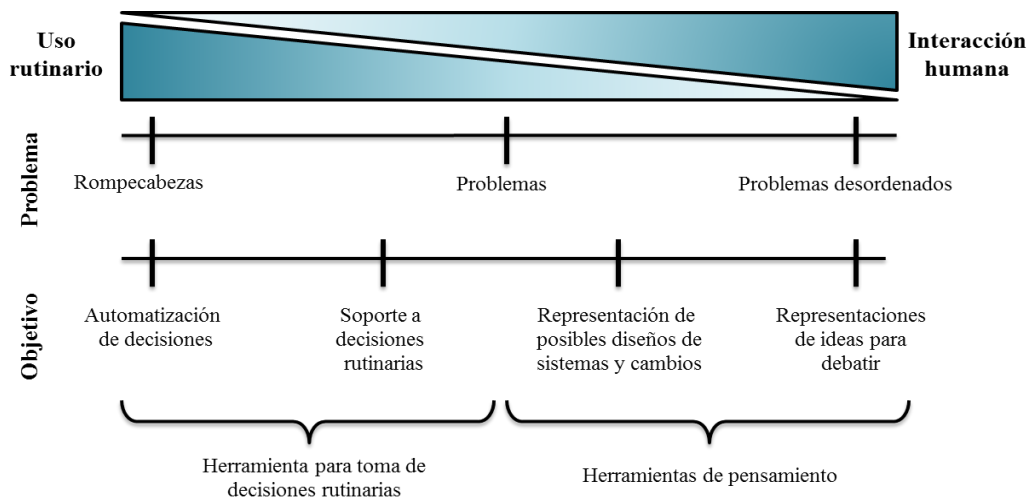


Figura 1 – Aproximaciones de modelamiento.

Fuente: Adaptado de Pidd (1999)

La minería es una actividad que involucra la extracción de recursos no renovables con el objetivo de obtener ganancias. Además, se ve afectada por factores humanos. Por ejemplo, esta actividad afecta directamente la

economía de las regiones, por lo que en este sistema no sólo intervienen las decisiones de las empresas mineras, sino también las políticas de entes reguladores y la opinión y percepción de la sociedad. Particularmente, el presente estudio tiene como objetivo el desarrollo de un modelo que permita evaluar el impacto de políticas ambientales y tributarias en el sector minero de Colombia y el impacto del mismo sector en las sociedades, el medio ambiente y la economía del país. A partir de este objetivo, se ha definido una lista de características particulares que debe cumplir el modelo que se va a desarrollar, que se presentan en la Tabla 3. Además las metodologías que cumplen con dicha característica se marcan con una X.

Tabla 3 – Características necesarias en un modelo del sector minero

Característica	MEE	DS	MFA
Análisis del comportamiento del sistema en el largo plazo	X	X	X
Modelamiento de las variables a partir del comportamiento real del sistema		X	X
Modelamiento de reservas, exploración y producción de mineral	X	X	
Comprensión de las interacciones entre variables		X	
Modelamiento de no linealidades, retardos, ciclos de realimentación	X	X	X
Modelamiento de toma de decisiones	X	X	
Fácil modelamiento de variables blandas a partir de información mental de expertos		X	
Evaluación del impacto de políticas y decisiones	X	X	

Como se puede observar en la Tabla 3, Dinámica de Sistemas se presenta como la mejor opción para la formulación de un modelo dinámico del sector minero. Por medio de esta metodología se pueden plantear escenarios que soporten la toma de decisiones en cuanto a inversiones, regulación ambiental, políticas tributarias y otros factores que afecten la atractividad del país como región minera.

2.3 Dinámica de sistemas (DS)

La metodología seleccionada en la sección anterior, DS, está basada en el modelado de flujos continuos de masa e información, utilizando dos tipos de objetos: los niveles, que son las cantidades que pueden acumular masa o información (variables de estado) y los flujos, que influyen en la acumulación o agotamiento de los niveles. Este conjunto de flujos y niveles constituyen las ecuaciones diferenciales del modelo. Para dicha formulación es necesario seguir un proceso iterativo que consta de los pasos que se describen a continuación (Morecroft, 2007).

2.3.1 Articulación del problema

En la etapa inicial es necesario identificar el problema que se quiere abordar, definir objetivos, aplicaciones y alcances del modelo, así como límites del mismo (variables exógenas y endógenas). Este proceso también incluye la construcción de un “modo de referencia”, conformado por información histórica (gráficos, tablas, etc.) que deja en evidencia el problema y da indicios de cómo será el comportamiento en el futuro. Además, se define también el horizonte de tiempo del modelo, que comprende tanto tiempo pasado, buscando replicar comportamiento, como futuro para analizar escenarios.

2.3.2 Formulación de hipótesis dinámica

Para formular una hipótesis dinámica es necesario identificar las variables endógenas y exógenas que intervienen en el problema de interés, así como las relaciones causales que existen entre ellas. La hipótesis dinámica se construye al enlazar las variables relacionadas mediante la construcción de un Diagrama Causal. Estos diagramas permiten observar ciclos de realimentación que se forman a partir de las relaciones causa-efecto; a partir de estos ciclos es posible explicar el comportamiento de los sistemas dinámicos.

2.3.3 Formulación del modelo matemático

En esta etapa la hipótesis dinámica se expresa como un diagrama de procesos de realimentación o diagrama de Flujos y Niveles (Morecroft, 2007; Sterman, 2000). Las expresiones matemáticas se formulan a partir de las hipótesis dinámicas planteadas en la etapa anterior y se definen condiciones iniciales para los estados y valores de los parámetros del modelo.

Para el desarrollo matemático del modelo, el presente estudio utiliza el software Powersim Studio. Este software permite realizar análisis de sensibilidad y optimizaciones, crear interfaces con botones de acceso y de ejecución creados por el usuario, conectar el modelo con bases de datos en Excel, etc. Estas funcionalidades facilitan el desarrollo del modelo y su posterior uso y modificación.

2.3.4 Validación

La validación es el proceso que le da confianza al modelo. En esta etapa se evalúa que tanto la estructura como el comportamiento del modelo representen fielmente el sistema real. Al igual que los anteriores, la validación es un proceso iterativo que puede requerir modificaciones en el modelo. La etapa de validación comprende la calibración del modelo, mediante el cual se busca que los resultados de la simulación se ajusten a datos históricos y un análisis de sensibilidad, que evalúa los resultados de las simulaciones ante variaciones de los parámetros.

2.3.5 Simulación de políticas y estrategias

Una vez validado el modelo formal matemático, se hace el uso del mismo para evaluar políticas o estrategias que permitan mejorar la situación problemática. Para esto se hacen cambios en la estructura del modelo y en algunos parámetros que puedan eliminar un comportamiento no deseado o favorecer una situación deseada. En esta fase se simulan diferentes escenarios donde se visualice el comportamiento bajo estos cambios de estructura y se realiza un análisis de los efectos de dichas políticas.

2.4 Alcance del modelo

El modelo desarrollado que se plantea, está pensado para modelar el sector minero en Colombia de forma agregada todo el sector minero. Este mira las interacciones de manera amplia a nivel país. El modelo busca entender el comportamiento general del sector minero mas no realizar predicciones sobre el mismo y, si bien permite responder preguntas del tipo ¿qué pasaría si? Por esta manera, es necesario comprender que el modelo no pretende modelar cada una de las unidades de producción minera de forma individual o la toma de decisiones dentro de las mismas. Las preguntas que el modelo responde, son aquellas que se pueden realizar en términos de variaciones en los valores o en la estructura considerada en el modelo. De igual forma, el modelo no está diseñado para reproducir hechos aislados o atípicos, de características muy específicas o casuales.

De esta forma, el principal aporte del modelo es el aprendizaje. El modelo permite experimentar sobre los futuros posibles del sector bajo escenarios específicos, bajo la aplicación (u omisión) de estrategias y políticas para el sector. Las simulaciones permiten observar no sólo el comportamiento de variables típicas, como producción, renta minera, etc., si no también estudiar el comportamiento de variables intermedias como reservas, atractividad del sector, exploración, desarrollo de nuevas minas, etc.

El modelo del sector minero se construye a partir de información proporcionados y validada por la UPME. Además, los insumos han sido levantados buscando representar los modelos mentales de diferentes actores de la UPME a partir de talleres de modelamiento. Sin embargo es necesario realizar supuestos sobre algunas de las variables, como informalidad, debido a la poca información disponible o dificultad de acceso a información de detalle. En la descripción del modelo, está de manera detallada los supuestos particulares para cada variable y las parametrizaciones.

2.5 El problema de planeación minera en el largo plazo

El primer paso en la formulación de un modelo dinámico es identificar y delimitar el problema de interés. En el presente estudio se quiere estudiar la planeación minera entre 2014 y 2032, pero esto puede implicar diferentes aspectos como problemas de incentivos, poca atractividad del país ante inversión extranjera directa, ilegalidad e informalidad en la minería, etc. Para identificar un problema claro, el equipo de trabajo de la Universidad Nacional realizó un taller de identificación del problema con la ayuda de un experto metodológico internacional. El taller se dirigió a diferentes funcionarios de la subdirección de minería de la UPME, Agencia Nacional Minera y Ministerio de Minas y Energía.

El taller se realizó en dos días, tal como se muestra en la Tabla 4. El primer día se realizaron tres bloques de discusión; en cada bloque el equipo de asistentes se dividió en equipos de cuatro o cinco personas que debían discutir y responder un cuestionario semi-estructurado (Ver anexo 1). Luego de la discusión entre equipos, se generaba una discusión entre todos los asistentes hasta llegar a un consenso. En el segundo día se realizaron entrevistas a diferentes personas, con el objetivo de identificar los detalles del funcionamiento de sub-sectores de la minería (producción, socio-ambiental, tributario, etc.). El cuestionario y acta de entrevistas se presentan en el Anexo 1.

Tabla 4 – Metodología de taller 1: El problema de la planeación minera en el largo plazo

	Bloque de discusión	Metodología	Objetivo
Día 1	Identificación del problema	Cuestionario semi-estructurado. Discusiones grupales.	Identificar fortalezas y amenazas del sector. Definir resultados deseados. Que información se quiere conocer en el futuro.
	Identificación de variables clave.	Cuestionario semi-estructurado. Discusiones grupales.	Identificar las variables a incluir en el modelo. Clasificación de variables como endógenas, exógenas o excluidas.
	Definición de detalles del modelo	Cuestionario semi-estructurado. Discusiones grupales.	Identificar los bloques de modelamiento. Seleccionar los minerales a considerar en el modelo.
Día 2	Identificación de detalles del modelo.	Entrevistas	Identificar particularidades de cada bloque del modelo (macroeconómico, producción, ambiental, social, sistema de regalías)

2.6 Formulación del modelo

2.6.1 Sesiones de capacitaciones en dinámica de sistemas

Uno de los principales objetivos del proyecto del modelo del sector minero en Colombia es transferir el conocimiento de la Universidad Nacional hacia la UPME, de tal forma que el modelo se desarrolle en conjunto entre las dos instituciones, y que en el futuro los mismos funcionarios de la UPME tengan la posibilidad de modificar, actualizar y complementar el modelo. Para esto, el equipo de la Universidad

Nacional de Colombia dictó un curso de dinámica de sistemas dirigido a dos funcionarias de la UPME, dividido en 4 sesiones. Las dos primeras sesiones se dictaron el 9 y 10 de septiembre de 2014, en estas se abordaron los conceptos básicos de dinámica de sistemas. Las sesiones 3 y 4 se dictaron el 7 y 8 de septiembre y abordaron temas avanzados en dinámica de sistemas. La metodología de estas sesiones se resume en la Tabla 7. Los detalles y actas se presentan en el Anexo 2

Tabla 5 – Metodología de capacitaciones en dinámica de sistemas

	Actividad	Metodología	Objetivo
Día 1	El proceso de modelamiento Ejemplos de identificación de problema en el sector minero.	Clase teórica y discusión	Aprender a identificar y delimitar problemas para ser abordados con dinámica de sistemas.
	Formulación de diagramas causales Diagrama causal para modelo de extracción de gas	Clase teórica. Taller	Aprender a formular diagramas causales. Formular un diagrama causal para extracción de gas natural, que sirva como referencia para la extracción de minerales.
	Planteamiento de diagramas de niveles y flujos	Clase teórica	Aprender a formular diagramas de flujos y niveles, como estructura básica para formulación matemática del modelo.
Día 2	Introducción a software de simulación. Taller de niveles y flujos – modelo de gas natural	Clase práctica	Identificar las funciones básicas del software de simulación. Formular un modelo de simulación para gas natural, que sirva como referencia para extracción de minerales.
	Revisión de información histórica del sector minero	Discusión	Identificar el modo de referencia del modelo.
Día 3	Retardos Taller de retardos	Clase teórica. Taller práctico	Entender los efectos de los retardos en los sistemas dinámicos
	Funciones no lineales y tabla	Clase teórica. Taller práctico	Aprender a construir funciones no lineales y a modelar variables blandas.
	Construcción de diagrama causal general del sector minero	Discusión	Formular un diagrama causal general para el sector minero en Colombia
	Construcción de diagrama causal para el módulo de producción	Discusión	Formular un diagrama causal que explique la dinámica de la extracción y producción de minerales.
	Construcción de un diagrama causal para los módulos social y ambiental	Discusión	Formular un diagrama causal que explique el efecto de impactos sociales y ambientales en la producción de un mineral.
	Validación de modelos en dinámica de sistemas Análisis de sensibilidad y optimización	Clase teórica. Taller práctico	Conocer las principales pruebas de validación de modelos dinámicos. Aprender a desarrollar análisis de sensibilidad y optimización de modelos.

2.6.2 Sesiones de modelamiento

Luego de capacitar al personal de la UPME, se inició el proceso de desarrollo del modelo formal del sector minero, para esto, se realizaron cuatro sesiones de modelamiento, en las que se formuló un diagrama de flujos y niveles, se plantearon ecuaciones y escenarios de simulación, se validó el comportamiento del sistema y se formularon estrategias de mejora para el sector minero. Las dos primeras sesiones se dictaron el 21 y 22 de octubre, la tercera sesión el 12 de noviembre, y la cuarta sesión se llevó a cabo el 3 de diciembre de 2014. A continuación se resume la metodología de cada sesión. Los detalles y actas se presentan en el Anexo 2.

Tabla 6 – Metodología de sesiones de modelamiento 1 y 2

	Actividad	Metodología	Objetivo
Día 1	Revisión de ecuaciones de módulo de producción. Simulaciones preliminares	Discusión	Definir las ecuaciones del módulo de producción.
	Revisión de ecuaciones de módulos social y ambiental	Discusión	Definir las ecuaciones de módulos social y ambiental
	Integración de modelo	Discusión	Crear un modelo integrado con todos los módulos para el carbón.
Día 2	Modelamiento de vectores	Taller práctico	Aprender a crear vectores en el software de simulación y realizar operaciones con ellos
	Revisión de detalles del modelo	Discusión	Definir parámetros de simulación. Identificar necesidades de información para el modelo.
	Definición de ajustes al modelo	Discusión	Asignar tareas de ajustes al modelo al equipo de trabajo UNAL Asignar tareas de recolección de información al equipo de trabajo UPME
Día 3	Revisión de modificaciones a diagramas causales	Discusión	Definir una hipótesis dinámica consolidada del sector minero
	Revisión de avances y ajustes a modelo matemático	Discusión	Definir un modelo consolidado del sector minero
	Discusión de detalles del modelo	Discusión	Definir la cantidad de minerales a incluir en el modelo, además del carbón. Definir las escalas de explotación a considerar en el modelo
	Revisión de propuesta de escenarios de simulación	Discusión	Definir los escenarios a simular
	Asignación de tareas de modelamiento y búsqueda de información	Discusión	Asignar tareas de modificación del modelo al equipo UNAL Asignar tareas de recolección de información al equipo UPME
	Taller de importación y exportación de datos a Excel	Taller práctico	Aprender a conectar los archivos en Powersim con hojas de cálculo en Excel.

	Actividad	Metodología	Objetivo
Día 4	Presentación de modelo final de carbón, oro y caliza	Discusión	Validar comportamiento del modelo
	Presentación de versión final de escenarios de simulación	Discusión	
	Presentación de propuesta de estrategias para el sector minero	Discusión	Definir y validar estrategias

2.7 Validación del modelo

Existen diferentes pruebas de validación de modelos dinámicos. Barlas (1996) clasifica las diferentes pruebas clasificadas en pruebas de estructura y pruebas de comportamiento. Esta metodología de validación se aplicó al modelo del sector minero en Colombia como se describe a continuación.

2.7.1 Pruebas directas de estructura:

a. Pruebas empíricas: confirmación de la estructura, confirmación de parámetros.

La hipótesis dinámica (diagramas causales) que se formuló en conjunto entre el equipo de trabajo UNAL-UPME se validó por medio de pruebas empíricas a la estructura. Para ello, se realizó un taller contó con la participación de un experto metodológico internacional y diferentes funcionarios de la subdirección de minería de la UPME, Agencia Nacional Minera y Ministerio de Minas y Energía. Además, durante las reuniones realizadas entre el equipo de trabajo UNAL-UPME (ver sección anterior) también se revisó la estructura del modelo y se ajustó según el conocimiento de expertos.

b. Pruebas teóricas: confirmación de la estructura, confirmación de parámetros, condiciones extremas, consistencia dimensional.

Para esto, se realizó la revisión de modelos con características similares, y se usaron como referentes las mediciones y valores de parámetros de países líderes en minería, como es el caso de Australia. En el caso de carencia de valores reportados de parámetros, éstos se definieron con la asesoría de expertos en minería de la Universidad Nacional y de la UPME. Durante el proceso de construcción del modelo que se presentó en la sección anterior, se verificó que cumpliera con la consistencia dimensional.

2.7.2 Pruebas de estructura orientadas al comportamiento:

En este tipo de pruebas se realizaron simulaciones de condiciones extremas, que consisten en evaluar que el modelo sea capaz de representar la realidad en el caso de que se presenten eventos extremos, como

precios iguales a cero, valores iniciales bajos de reservas, etc. También se realizan pruebas de sensibilidad del comportamiento para evaluar la importancia de parámetros dentro del modelo.

2.7.3 Pruebas directas de comportamiento:

Se recolectó información histórica sobre el comportamiento de variables como la producción de minerales, que sirvieron de referente para la calibración del modelo. Por medio de métodos de optimización se realizó una calibración de parámetros para ajustar el modelo a los datos históricos.

3. Evolución del sector minero

3.1 Datos históricos de minería en Colombia

Actualmente la economía colombiana es la cuarta más grande en Latinoamérica. El crecimiento económico del país se ha debido, entre otros, al crecimiento del sector minero, particularmente en la última década. Esta industria extractiva se concentra en la producción de carbón, oro, plata, hierro, ferroníquel y materiales para la construcción. La dinámica de producción de cada uno de estos recursos es distinta pero, en su mayoría, obedece a factores del contexto internacional, y en ciertos casos a factores internos.

A continuación se presentan el comportamiento de las principales variables del sector minero de los minerales seleccionados por el equipo de trabajo (UNAL y UPME conjuntamente) para incluir en el modelo: oro, carbón y caliza, como producción, precios, ingresos por regalías, exportaciones, etc. Esta información conforma el modo de referencia del modelo a desarrollar.

3.1.1 Producción y precios

La producción de carbón en Colombia ha crecido sostenidamente en las dos últimas décadas; de hecho, la producción en 2013 es cuatro veces mayor a la producción en 1990, como se muestra en la Figura 2. Este crecimiento se ha dado principalmente a partir de las minas ubicadas en el norte de Colombia, con un alto flujo de exportaciones carboníferas para atender las demandas energéticas de economías emergentes como Brasil, Chile, China y Turquía, y de economías desarrolladas como los Estados Unidos y Países Bajos. La alta demanda internacional de este mineral se ha visto a su vez reflejada en las alzas de los precios del carbón en sus distintos tipos (ver Figura 3).

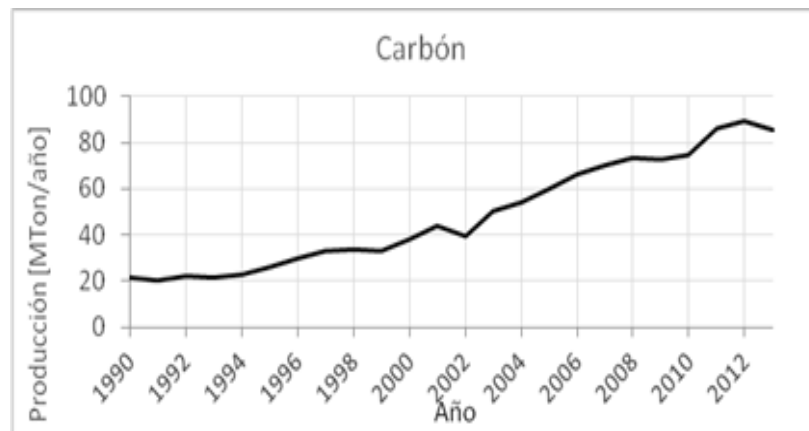


Figura 2 – Producción de carbón en Colombia. Periodo 1990 - 2013. **Fuente:** Elaboración propia con datos de SIMCO(UPME, 2014).

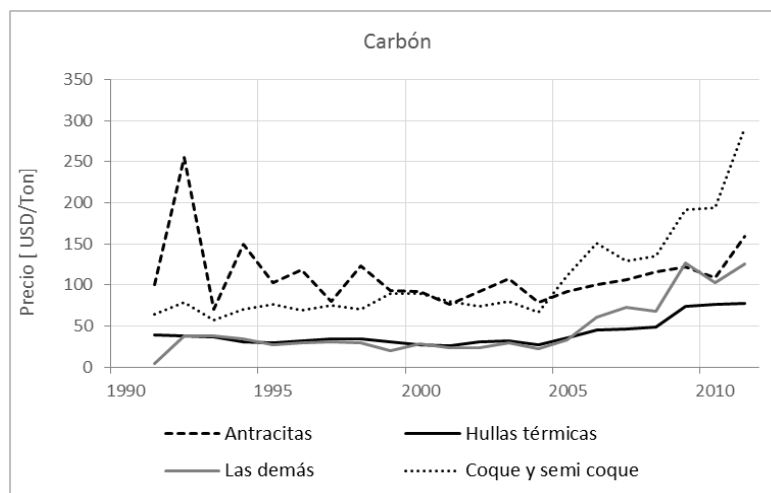


Figura 3 – Precio internacional de carbón. Precios corrientes. Periodo 1991 -2011. **Fuente:** Elaboración propia con datos de (MME & UPME, 2011; UPME, 2010)

La Figura 4 muestra la producción de oro desde 1990 hasta 2013. El crecimiento de la producción de oro se ha dado en medio de un crecimiento de la demanda internacional de este metal, ya que es uno de los principales activos refugio durante la crisis financiera a finales de los 2000. La mayor parte de esta producción proviene de dos compañías: Gran Colombia Gold Corp. y Mineros S.A.(Wacaster, 2012). Al igual que otros *commodities*, el precio de este metal precioso tuvo alzas considerables al cuadruplicar su valor en los últimos 10 años, pasando de menos de 400 US\$/Oz en la primera mitad de la década de 2000 a más de 1600 US\$/Oz en 2012, como se muestra en la Figura 5.

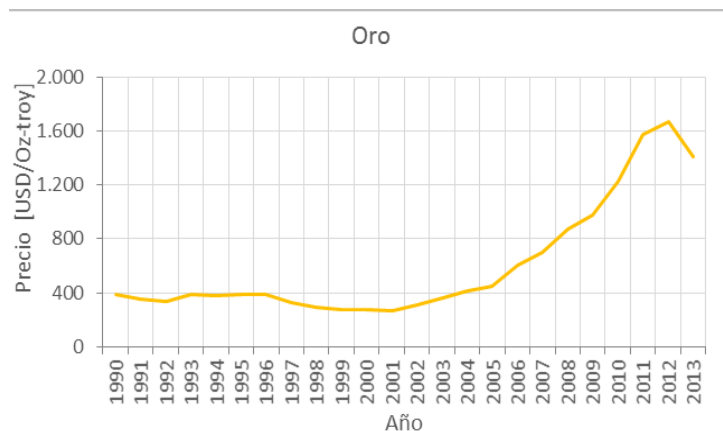
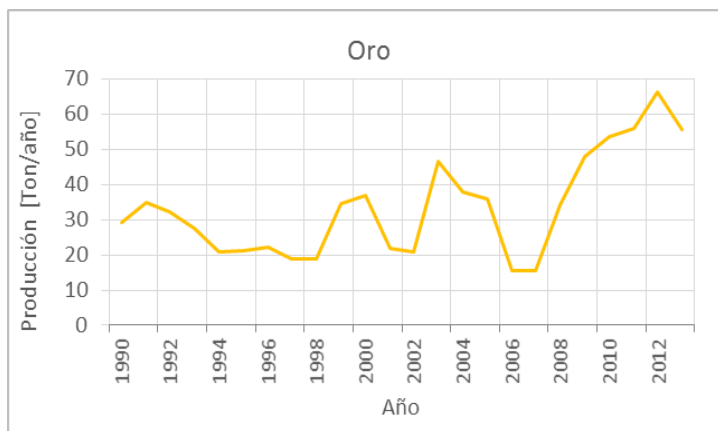


Figura 4 – Producción de oro en Colombia.

Periodo 1990 - 2013. **Fuente:** Elaboración propia con datos de SIMCO (UPME, 2014)

Figura 5 – Precio internacional de oro.

Precios corrientes. Periodo 1990 - 2013. **Fuente:** Elaboración propia con datos de (Indexmundi, 2014; UPME, 2014)

Por el contrario el crecimiento de la extracción de materiales para la construcción, específicamente la caliza (ver Figura 6), se explica principalmente por la dinámica que ha tenido el sector de la construcción en la última década, el cual pasó de tener una participación en el PIB de 4.4% en el año 2000, a más del 6.5% en los últimos años.



Figura 6 – Producción de caliza.

Periodo 1990 - 2013. **Fuente:** Elaboración propia con datos de SIMCO (UPME, 2014)

3.1.2 Exportaciones

El PIB minero aumentó su participación dentro del PIB total pasando de un 1.82% en 2000 a un promedio de 2.3% en los últimos años. Gran parte de esta producción vino acompañada de un incremento de grandes proporciones en las exportaciones del sector minero al pasar de cerca de 1500 millones de dólares FOB en los años 2001 y 2002 a más de 12000 millones de dólares FOB en 2012. Como se muestra en las Figuras 10

a 12, dicho aumento está soportado en los mayores volúmenes de exportación de minerales y metales como carbón, oro y caliza.

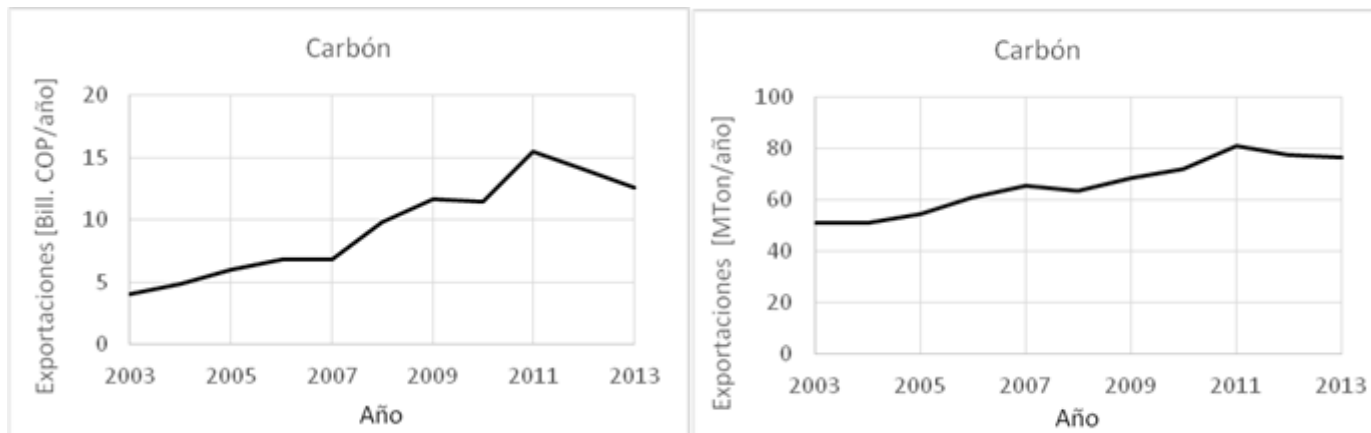


Figura 7 – Exportaciones anuales de carbón.

Precios corrientes. Periodo 2003 - 2013. **Fuente:**Elaboración propia con datos de SIMCO (UPME, 2014)



Figura 8 – Exportaciones anuales de oro

Precios corrientes. Periodo 2003 - 2013. **Fuente:**Elaboración propia con datos de SIMCO (UPME, 2014)

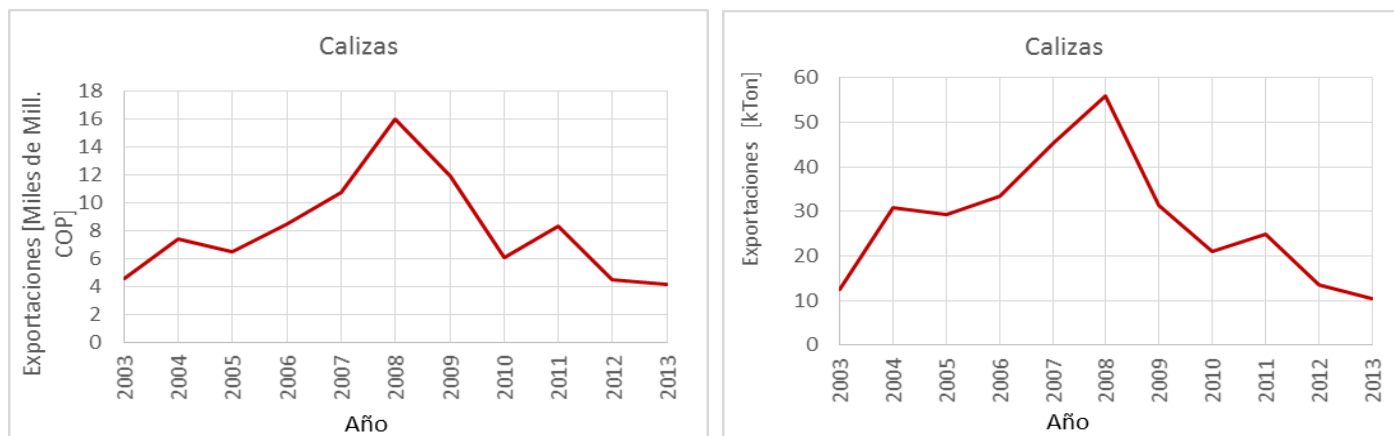


Figura 9 –Exportaciones anuales de materiales de construcción

Precios corrientes. Periodo 2003 - 2013. **Fuente:** Elaboración propia con datos de SIMCO (UPME, 2014)

3.1.3 Renta minera

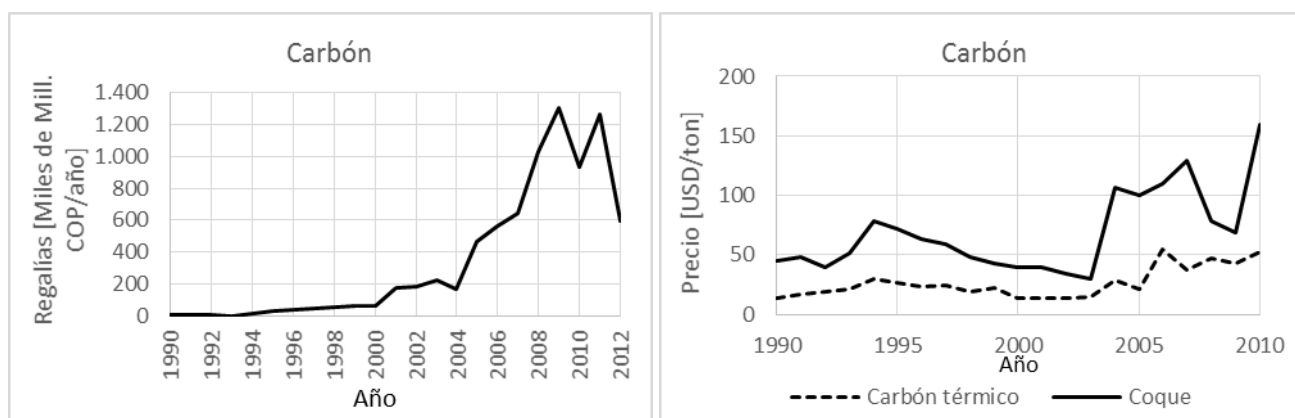
Al igual que la producción y los precios de los principales minerales, las regalías liquidadas por las empresas mineras al Estado colombiano también aumentaron en las últimas dos décadas. Un ejemplo claro es el monto percibido por regalías asociadas a carbón, las cuales crecieron aceleradamente entre 1990 y 2009, como se muestra en la Figura 10. Sin embargo, entre 2011 y 2012 se observa una reducción de más del 50%. Este último hecho se puede deber a cambios en el precio, a su vez ligado a la sustitución de carbón por otros energéticos, como gas *shale*. Muchas empresas, no obstante, pueden haber aumentado su producción independientemente del precio actual, pues tienen compromisos preestablecidos en contratos anteriores.

Actualmente, la liquidación de las regalías generadas a partir de extracción de los distintos minerales se basa en los porcentajes contemplados en la Ley 756 de 2002 (antiguo régimen de regalías). Los porcentajes expresados en esta ley se muestran a continuación en la Tabla 7. Sin embargo, algunas empresas tienen contratos en virtud de aporte, y los porcentajes de regalías son diferentes y acordados con el estado. El recaudo por este tipo de contratos puede ascender al 80% de las regalías de carbón.

Tabla 7 –Porcentajes para el pago de Regalías Mineras. Ley 756 de 2002.

Mineral	% de pago
Carbón (explotación mayor a 3 millones de toneladas anuales)	10
Carbón (explotación menor a 3 millones de toneladas anuales)	5
Níquel	12
Hierro y cobre	5
Oro y plata	4
Oro de aluvión en contratos de concesión	6
Platino	5
Sal	12
Caliza, yesos, arcillas y grava	1
Minerales radioactivos	10
Minerales metálicos	5
Minerales no metálicos	3
Materiales de construcción	1

Fuente:(Congreso de la República de Colombia, 2002)

**Figura 10** – Ingresos anuales y precio interno de liquidación de regalías de carbón.

Precios corrientes, periodo 1990 – 2012. **Fuente:** Elaboración propia con datos del Sistema de SIMCO (UPME, 2014) y (UPME, 2010)

Para metales preciosos, en particular el oro, las regalías percibidas incrementaron durante la segunda mitad de la década de 2000, pero cayeron desde 2011 (ver Figura 11) hecho que, parcial pero no totalmente, se explica por la caída en el precio internacional del oro.

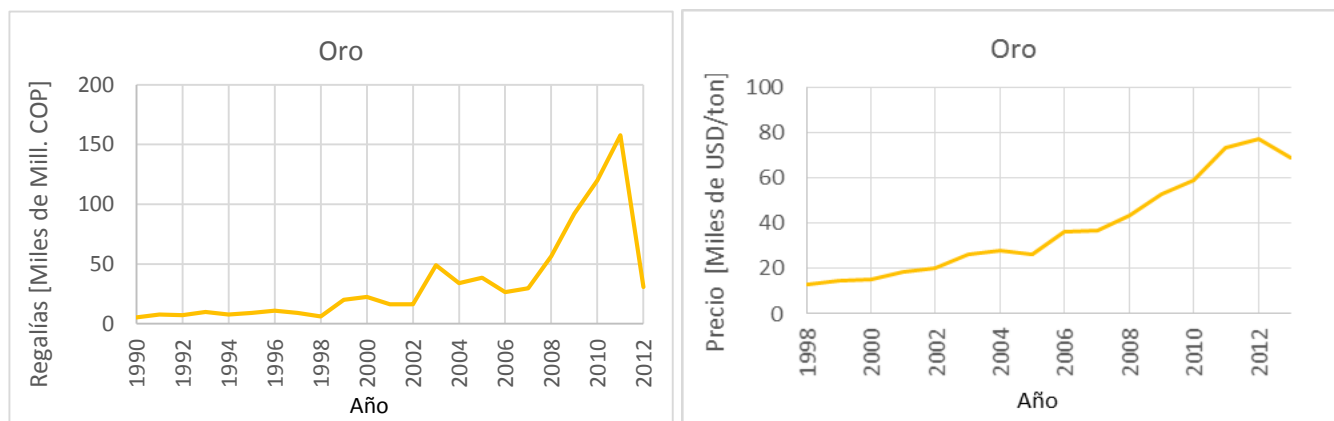


Figura 11 – Ingresos anuales y precio de liquidación de regalías de oro. Precios corrientes. Periodo 1990 - 2012. **Fuente:** Elaboración propia con datos de SIMCO (UPME, 2014) y (Banco de la República de Colombia, 2014b)

3.1.4 Otra información

Empleos Generados

La Figura 12 muestra el número de empleos generados por el sector minero en Colombia y su participación con respecto al total del empleo nacional. En esta se observa que este porcentaje ha variado poco en la última década, entre 1% y 1.2%, pero se registró un incremento mayor al 60% en la ocupación total generada en el sector. La mayoría de estos empleos provienen del carbón, ferróníquel y oro.

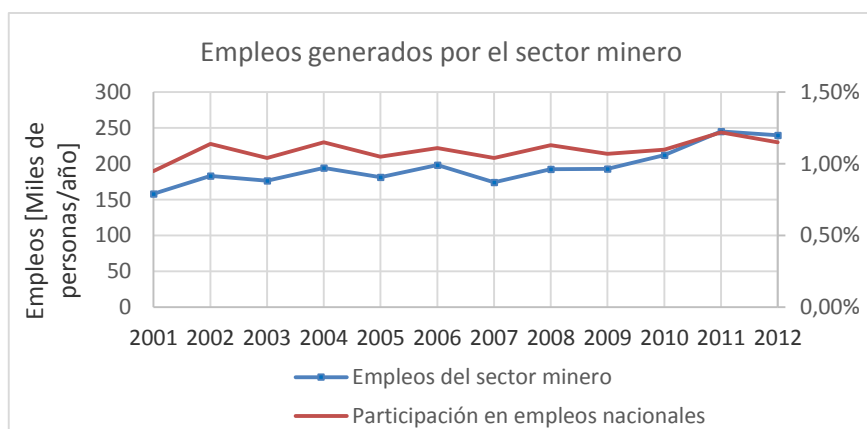


Figura 12 – Empleos generados por el sector minero y participación en empleos nacionales. Periodo 2001-2012. **Fuente:** Elaboración propia con datos de la DIAN.

Reservas

Actualmente, la información sobre evolución histórica de las reservas de minerales en el país es limitada. Se conocen algunos datos puntuales de reservas medidas para carbón, como se muestra en la Figura 13, que muestran un crecimiento en las reservas de carbón entre 1979 y 1999, y un comportamiento

aproximadamente constante entre 1999 y 2011. En la Tabla 8 se presentan los datos de reservas en diferentes años, según el reporte de las empresas mineras en Colombia.

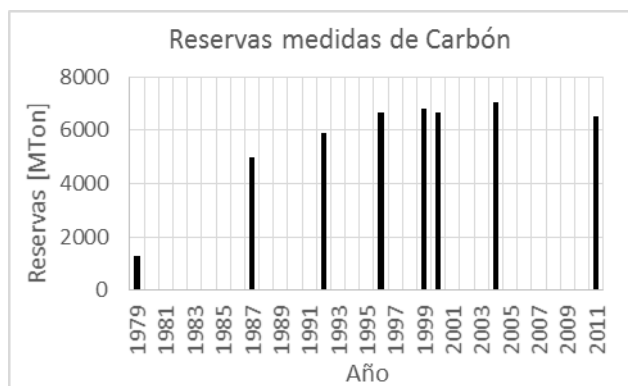


Figura 13 –Reservas medidas de Carbón.

Periodo 1979-2011. **Fuente:** Elaboración propia con datos de: (MME & INGEOMINAS, 2004; UPME, 2012);

Tabla 8– Reservas de diferentes minerales.

Mineral	Unid.	Reservas Medidas en 1987	Reservas Medidas en 1993	Reservas Medidas en 1998	Reservas Inferidas en 2013
Oro	Ton	930,93			1854,70
Plata	Ton				3830,39
Platino	Ton	5,03		4,39	
Hierro	Mton	195,00			
Cobre	Mton	10,20			0,74
Uranio	Kton		40,00		
Minerales de fosfatos	Mton	12,81			
Minerales de magnesio	Kton	54,00			
Sal	Mton	141,00			
Yeso	Mton	2,47			
Caliza	Mton	994,03			
Arcillas	Mton	3,50			

Fuente: Elaboración propia con datos de (Anglogold Ashanti, 2011; ATICO MINING, 2013; ECO ORO, 2011; Gran Colombia Gold, 2014; INGEOMINAS, 1987; MINATURA, 2014; SEAFIELD RESOURCES, 2014; Wacaster, 2012)

Inversión extranjera directa

Dentro del comportamiento de la inversión extranjera directa, la inversión dirigida al sector minero ha jugado un rol importante en los últimos 10 años, particularmente en 2009 donde la inversión superó los

3000 millones de dólares. Este flujo de inversión fue dirigido principalmente hacia la extracción de carbón, ferroníquel y oro.

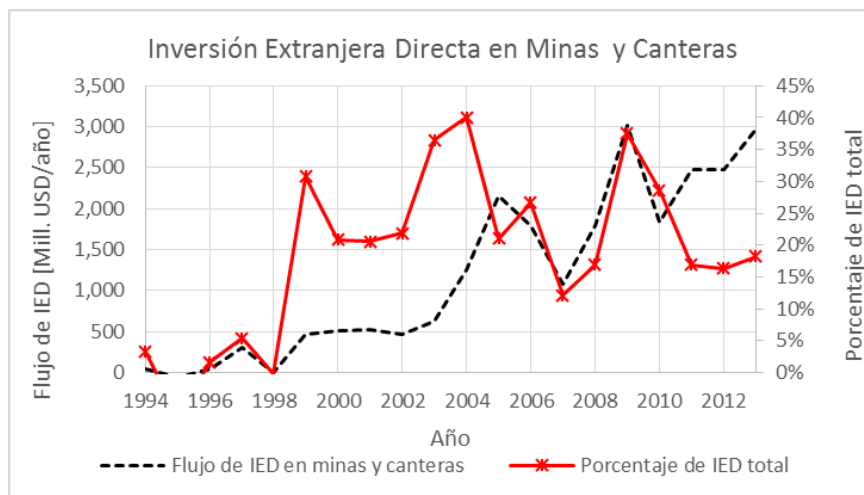


Figura 14 –Inversión extranjera directa (IED) en minas y canteras.

Periodo 1994-2013. **Fuente:** Elaboración propia con datos de(Banco de la República de Colombia, 2014a)

3.2 Tendencias mundiales

En esta sección se presenta un resumen de las principales tendencias en demanda, oferta, costos y riesgos del sector minero a nivel internacional. Un análisis más detallado de tendencias mundiales se presenta en el estudio Escenarios Mineros para Colombia realizado por la UPME y la Universidad Nacional en 2013 (UPME & Universidad Nacional de Colombia, 2013)

3.2.1 Demanda

Históricamente, la demanda mundial de metales industriales básicos ha cambiado poco en un horizonte de 10 a 50 años ($\pm 1\%$ o 2% anual), y se espera que mientras no haya una revolución tecnológica súbita o grandes cambios económicos mundiales a la vista, la demanda global no se aparte de esas tendencias (Rosenau-Tornow, Buchholz, Riemann, & Wagner, 2009). Algunos factores que influyen en la demanda de materiales y minerales son: el ingreso, los cambios en políticas públicas, las regulaciones, las nuevas tecnologías que afectan el crecimiento de la demanda, la sustitución de minerales, la producción industrial, la población y la migración a las ciudades (Rosenau-Tornow et al., 2009). En el largo plazo, la demanda de minerales se ve afectada por factores como seguridad, la salud, y las preocupaciones ambientales que se asocian con ciertos minerales (Sohn, 2005).

De estos factores, el crecimiento poblacional, el crecimiento del ingreso y el cambio tecnológico son los más importantes para proyectar consumo de minerales en el largo plazo (Sohn, 2005). Entre 2000 y 2012 la tasa de crecimiento poblacional mundial fue del 1% promedio anual –la población mundial pasó de 6200 a 7000 millones de habitantes– y se estima que esta tendencia se mantenga en los siguientes 10 años (El Banco Mundial, 2013). Para 2020 se proyecta que el total de la población mundial ascenderá a 7600 millones de habitantes y que el 58% de estos estará en países en desarrollo (El Banco Mundial, 2013). En la medida en que las economías en desarrollo crezcan, este crecimiento poblacional jalonará la demanda de minerales.

Se espera que para el 2050, el PIB de las economías emergentes exceda el del G7 en un 64%. Se ha encontrado que el aumento en las tasas de urbanización y en los estándares de vida en naciones en desarrollo se correlaciona positivamente con el aumento en la demanda de minerales y metales. De acuerdo con el ICMM (International Council on Mining & Metals, 2012), a medida que el ingreso per cápita alcanza los 5000 – 10000 USD/año, la demanda de metales aumenta rápidamente.

3.2.2 Oferta

Los principales factores determinantes en la oferta de minerales son los costos, la tecnología, las condiciones políticas, económicas y financieras y la mejora de los instrumentos de gestión de riesgos (Sohn, 2005). Estos factores no operan solos, sino que son parte de un sistema integrado que incluye restricciones sociales y fuerzas impulsadoras como asuntos ambientales y la estructura de la industria minera (Rosenau-Tornow et al., 2009).

La oferta de productos minerales está sujeta a los ciclos económicos y a las fluctuaciones y ciclos de precios de las materias primas. Las fluctuaciones de precio ocurren cuando la oferta no puede satisfacer con suficiente rapidez los aumentos repentinos de la demanda y son mayores si la demanda es inelástica, como en muchas cadenas de valor de la industria de minerales (Rosenau-Tornow et al., 2009). Tanto los consumidores de metales, como los fabricantes manufactureros tienen poca capacidad para ajustar su equipo de producción rápidamente y tienen que aceptar los precios altos (Rosenau-Tornow et al., 2009). Cuando los precios se mantienen altos durante la expansión económica, se hacen más inversiones en exploración de materias primas (Rosenau-Tornow et al., 2009). El efecto de esta inversión es de mediano plazo debido al relativo largo tiempo requerido para poner en marcha los nuevos proyectos mineros (Sohn, 2005). Al final del ciclo, hay exceso de oferta de materiales y caen los precios. Esto lleva a cierres y a una reducción de la oferta y el ciclo reinicia (Rosenau-Tornow et al., 2009).

3.2.3 Costos

Los costos de producción de minerales dependen en parte de factores físicos predeterminados como la geología de los depósitos, su calidad, tamaño y su distancia a los puertos y plantas. Hay costos directos de producción como la mano de obra, los precios de los energéticos, repuestos, explosivos y productos de acero (Meister, n.d.). Otros costos externos son los impuestos de producción y las regalías. En la primera década de los 2000, los costos de producción de minerales aumentaron en general, como resultado del agotamiento de reservas de bajo costo, el aumento en los costos laborales en algunos países y el aumento en las distancias de transporte terrestre. Marston Mining Consultants reporta aumentos de costos de producción cercanos al 50% entre 2003 y 2008 en países como Australia, Indonesia, Sudáfrica y Venezuela (Meister, n.d.). Parte del aumento de los costos corresponde al aumento general en los precios de otras materias primas como la electricidad y los combustibles líquidos.

A medida que la producción acumulada de minerales aumenta y gracias a avances tecnológicos, se ha incrementado la explotación de recursos más profundos, con menores tenores, más alejados de los mercados y con minerales más complejos y difíciles de procesar (International Council on Mining & Metals, 2012). Al mismo tiempo, aumentan las expectativas de la sociedad en cuanto al cumplimiento de estándares ambientales, sociales y de rendimiento por parte de la minería. Como consecuencia de estas tendencias, los costos de producción han aumentado y la industria minera moderna requiere mayores capitales y personal capacitado con el fin de desarrollar nuevos procesos, equipos y tecnología (International Council on Mining & Metals, 2012).

Al igual que los costos de explotación, los costos de exploración han aumentado. Las zonas disponibles para exploración son cada vez más remotas y de mayor riesgo, con lo que los costos de exploración crecen (Atlas Copco, n.d.). Algunos de estos aumentos de costos pueden ser compensados por el uso de nuevos métodos, y por la inversión en equipos de exploración con mayor tecnología (Atlas Copco, n.d.). En general, se espera que, en el corto plazo, las mejoras en productividad, los avances tecnológicos y el logro de mayores economías de escala, compensen la tendencia al alza de los costos de producción minera (Meister, n.d.).

3.2.4 Riesgos

Ernst & Young (2014) identificó los principales 10 riesgos de negocio en la minería para el periodo 2014 – 2015. Los 5 riesgos más importantes son:

- (i) **Productividad**, que ha disminuido en los últimos 10 años como consecuencia de un mercado enfocado a producir grandes volúmenes; esto a su vez impulsado por el incremento en los precios.

- (ii) **Capital.** La dificultad de empresas junior para acceder a capital, y el reto de las empresas senior para administrar, optimizar e incrementar su capital.
- (iii) **Licencias sociales** para operar, que pueden llevar a la empresa a incurrir en altos costos; existe además el reto de ganar aceptación en la sociedad.
- (iv) **Nacionalismo de recursos.** A pesar de que los países están tomando acciones para atraer inversión extranjera en minería, están a su vez buscando mayores retornos por parte del sector minero. Las principales acciones que toman los gobiernos son el aumento de impuestos y la reglamentación de procesamiento del mineral dentro del país. Estas acciones conllevan a aumento de costos de la firma minera.
- (v) **Proyectos de capital.** Es necesario garantizar que los proyectos se entregarán a tiempo y dentro del presupuesto, pues los retrasos y excesos de presupuesto pueden llevar a pérdidas, según el ciclo del mercado.

Otros riesgos que afectan el negocio de la minería actualmente son precio y volatilidad de monedas, falta de infraestructura, compartir beneficios con los países, balance entre oferta y demanda de capital humano, y acceso a energía y agua.

4. El problema de la planeación minera en el largo plazo

En este capítulo se presentan los resultados del taller 1, en el que se identificó el problema a abordar con el modelo y se identificaron las variables más importantes. En el Anexo 1 se presentan los detalles de la metodología del taller (cuestionario y entrevistas). A partir de la información recolectada en el taller se plantean hipótesis dinámicas del comportamiento del sector, mediante la formulación de diagramas causales para cada módulo. Algunos de los aspectos aquí discutidos se fortalecieron con el desarrollo de las sesiones de capacitación y modelamiento que se describieron en el capítulo 2.

4.1 Identificación del problema

4.1.1 Fortalezas y debilidades del sector: Estructuración del problema

En la primera sesión de discusión del taller 1, los asistentes se dividieron en dos equipos de trabajo interdisciplinarios. A cada grupo se le asignó la tarea de responder las preguntas planteadas en el taller, que luego se discutieron entre todos los asistentes hasta llegar a un consenso. A continuación se presentan los principales puntos a resaltar de la discusión:

Tabla 9 – Fortalezas y debilidades del sector minero en Colombia

FORTALEZAS	DEBILIDADES
Potencial geológico aparente. Se da por sentado que el potencial es grande, aunque no se conoce exactamente cuánto es.	Falta de conocimiento geológico de detalle e información específica complementaria, como delimitación de zonas mineras.
Estabilidad económica del país. Implica atractividad para inversión extranjera.	No hay seguridad jurídica para empresas inversionistas. Las leyes son ineficientes y las reglas de juego cambian con alguna frecuencia.
Política de apertura a inversión extranjera. La presencia de empresas extranjeras da soporte y atractividad para otras.	Ilegalidad, informalidad y criminalidad en la explotación.
Ubicación geográfica brinda facilidades de transporte.	Poca competitividad del país debido a tributación, falta de infraestructura, etc.
Institucionalidad con roles definidos. Existe la intención de seguir fortaleciendo la institucionalidad.	Desarticulación institucional.
Existe un marco normativo.	Corrupción y distribución desigual de la renta minera.

FORTALEZAS	DEBILIDADES
El país hace parte de iniciativas internacionales, como el actual proceso de vinculación a OECD, para lo que deberá cumplir con diferentes requisitos.	Falta de visión integral del modelo de desarrollo del sector. Sólo se enfoca en ingresos económicos y no se miden otros beneficios.
Hay iniciativa para incrementar capital humano calificado, que de hecho viene en aumento.	Falta de capital humano capacitado, en especial en las regiones mineras.
	Déficit de gestión social y ambiental que ha llevado a desinformación y estigmatización del sector.
	Pocos esfuerzos para regulación ambiental y gestión social.
	Visión asistencialista del gobierno.

Fuente: Elaboración propia con información del taller 1.

A partir de lo anterior, se identificó que algunas debilidades son consecuencia de otras, por lo que se identificaron seis elementos claves que conforman el problema a tratar, como se describe a continuación:

- **Articulación institucional:** Hay poca articulación tanto entre entidades de planeación como entre entidades locales y centralizadas. Esto lleva a poca seguridad jurídica, lo que desencadena en incumplimiento de la ley (ilegalidad, informalidad, etc.).
- **Reglas de juego:** El constante cambio de la normativa lleva a que disminuya la competitividad del país con otros países mineros, y a que muchos mineros pequeños opten por ser ilegales, pues el costo de ser legal es muy alto. Una articulación institucional puede permitir formular reglas de juego más estables.
- **Gestión social y ambiental:** La falta de articulación y las debilidades de la normativa ambiental han llevado a poca gestión social y ambiental. No se han hecho esfuerzos por presentar la minería de forma integral en las comunidades, explicando riesgos y beneficios para la región. Existe desinformación que ha llevado a rechazar la minería legal, dando entrada a minería informal y extracción ilícita.
- **Competitividad:** El país es poco competitivo con relación a otros países mineros. Esto es un resultado de múltiples factores: la inestabilidad en las normas del juego, la falta de articulación institucional, la mala infraestructura, seguridad, corrupción y la falta de información en el sector, entre otros.
- **Información:** El conocimiento de los recursos reales del país y la información actualizada de variables como producción, reservas, costos, etc., son importantes para la toma de decisiones en inversión. La información en el país es débil y desactualizada, lo cual afecta negativamente la competitividad. Una mejor articulación institucional permite conformar sistemas de información completos y actualizados.
- **Ilegalidad, informalidad y corrupción:** Las normativas inestables y falta de articulación institucional han dado entrada a la minería ilegal; además los programas de formalización han tenido bajas eficiencias (inferiores al 5%) debido a que no se han enfocado adecuadamente, por lo que los mineros

informales perciben un costo de legalización mayor a los beneficios. La falta de presencia institucional en las regiones ha dado cabida a extracción ilícita. La corrupción se beneficia de una institucionalidad débil y de la falta de estabilidad en el marco normativo asociado con la minería.

En la Figura 15 presenta un diagrama que muestra las relaciones entre las 6 variables clave que conforman el problema de estudio, en este se resaltan en rojo las causas del problema – Reglas de juego, articulación, información y gestión social y ambiental – que han llevado a baja competitividad y alta ilegalidad, informalidad y corrupción.

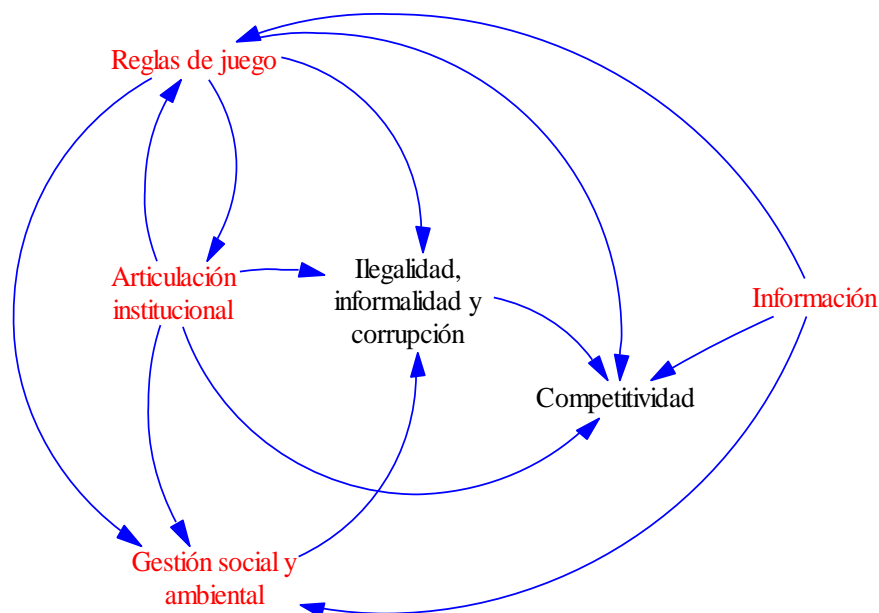


Figura 15 – Diagrama causa efecto del problema de la planeación minera en el largo plazo en Colombia

Fuente: Elaboración propia con información del taller 1.

4.1.2 Resultados deseados o ideales para el sector minero en el largo plazo

Partiendo del problema anteriormente descrito, los asistentes plantearon diferentes resultados deseados para el sector minero. El modelo en desarrollo debe mostrar si es posible alcanzar estas metas y bajo qué condiciones. Los resultados esperados son:

- Se espera una minería responsable social y ambientalmente, competitiva, con buena imagen ante medios, sociedad e inversionistas y que genere beneficios observables en las regiones.
- Fortalecimiento institucional con indicadores definidos.
- Balance entre producción e impacto ambiental.

- Regulación de forma articulada, considerando todos los factores y entes involucrados (ambiente, sociedad, impuestos, etc.)
- Incremento en la participación del sector minero en el PIB de forma sostenida. Se espera que para 2020 el porcentaje del sector minero en el PIB sea de 3.3% y para 2032 de 4.6%.
- Un PIB positivo en los departamentos mineros.
- El 100% de la minería legal y formal en 2032.
- Mejor percepción de la minería, como resultado de una mejor fiscalización y una disminución de la ilegalidad.
- Asignación incremental de regalías en las regiones mineras.
- Incremento en el conocimiento del potencial geológico del país.
- Encadenamientos hacia adelante y hacia atrás que generan desarrollo en las regiones

4.1.3 Información que se quiere conocer en el futuro:

El equipo de asistentes al taller 1 indicó que, en caso de tener un clarividente, harían las siguientes preguntas:

- ¿Cuánto será la producción y las reservas de minerales dentro de 20 años?
- ¿Cuál será la participación del sector minero en el PIB?
- ¿Cuál será el monto de inversión extranjera directa e inversión nacional en minería?
- ¿Cuál será el beneficio del estado por renta minera?
- ¿Qué condiciones se requieren para que se dé una minería competitiva?
- ¿Cómo influyen las normas actuales en el futuro de la minería?
- ¿Cuál es el efecto de que hayan cambios en las normas?
- ¿Cuáles son los usos futuros de los minerales, que puedan afectar la demanda?
- ¿Qué tanto valor agregado (encadenamientos) genera la minería en las regiones?
- ¿Cuál es el porcentaje de las regalías en el PIB?
- ¿Qué efecto tendrá el cambio climático en la minería y viceversa?
- ¿Cuál es el efecto de los programas de formalización/legalización en el porcentaje de minería ilegal e informal?

Si bien no todas las preguntas pueden responderse con un modelo dinámico, estas sí constituyen una guía para el desarrollo del mismo, pues permiten visualizar la información que se espera de este (salidas del modelo).

4.1.4 Escenario optimista para el sector minero:

En la Tabla 10 se muestran algunos resultados optimistas pero realistas que se esperan para 2020 y 2032. Estos escenarios, junto con los resultados ideales, constituyen metas que se pueden evaluar con el modelo. Se espera que el modelo de información sobre las posibilidades de alcanzar dichas metas.

Tabla 10 – Resultados optimistas y realistas para el sector minero en el largo plazo

2020	2032
<ul style="list-style-type: none"> - Mejora la reputación del sector. - Inicio de nuevos proyectos mineros y arranque de los proyectos estancados. - Incremento moderado pero sostenido del sector minero, por encima de la inflación. - Se mantiene el PIB minero (2.3%), o aumenta un punto porcentual (3.3%). - Se sostiene la inversión extranjera actual. 	<ul style="list-style-type: none"> - La reputación del sector es buena. - Proyectos mineros definidos. - Incremento acelerado en la producción. - Se duplica el PIB minero (4,6%). - Se duplica la inversión extranjera directa. - Aumento de un 30% en la formalidad.

Fuente: Elaboración propia con información del taller 1.

4.2 Delimitación del problema

4.2.1 Variables que afectan el problema

En la segunda sesión de discusión se le pidió a cada equipo que identificara las variables que considera importantes para el desarrollo del modelo. A continuación se establecieron los límites o alcances del modelo, pues se decide cuáles variables son endógenas, exógenas o excluidas. Durante la discusión se observó que algunas variables se pueden considerar tanto endógenas como exógenas. Algunas de estas son: inversión extranjera, pues esta depende de la atractividad del país (interno) y de condiciones particulares del inversionista (factor externo); y gestión social, que se puede dar desde otros sectores o instituciones, o desde las mismas firmas mineras. A continuación, la Tabla 11 muestra la lista de variables que surgieron en la discusión.

Tabla 11 – Variables propuestas en taller 1

ENDÓGENAS	EXÓGENAS
Conocimiento geológico (recursos conocidos)	Impuestos
Reservas (diferentes niveles)	Marco regulatorio ambiental (Licencias, tiempos)
Producción	Precio de los minerales
Regalías	Marco regulatorio social
Marco regulatorio minero	Educación
Capital humano calificado requerido	Infraestructura
Transferencia de tecnología	Recursos financieros para el sector

ENDÓGENAS	EXÓGENAS
Investigación y Desarrollo (Tecnologías apropiadas, generación de conocimiento)	Inflación, tasas de interés, PIB. Indicadores macroeconómicos
Percepción de la industria minera	Conflictos por uso del suelo
Potencial geológico	Competencia con otros sectores
Inteligencia de mercados (benchmarking)	Conflicto social
Perfilamiento del inversionista	Cambio climático
Inversión extranjera	Inversión extranjera
Inversión nacional	Sustitutos de minerales
Impacto social	Transparencia
Impacto ambiental	Capacidad institucional a nivel local
% de formalidad	
% de legalidad (titularización)	
Empleo indirecto	
Costos de producción	Costos de insumos
Encadenamientos (valor agregado)	
Productividad (optimización de recursos)	
Nivel de asociatividad (pequeños mineros)	
% PIB minero	
Gestión y diálogo social	Gestión y diálogo social
Responsabilidad social (público, privado y país)	

Fuente: Elaboración propia con información del taller 1.

Durante las diferentes sesiones de capacitaciones y modelamiento (ver sección 2.6) se estudió cada una de las variables anteriores, y se llegó a una lista final de variables a incluir en el modelo. Estas variables y su categorización (endógena o exógena), se presentan en la Tabla 12. Adicionalmente, se muestra cuáles variables se excluyeron del modelo.

Tabla 12 – Variables definitivas a incluir en el modelo

Variable	Tipo	Comentario
Exploración	Endógena	
Reservas probables, reservas probadas y reservas en desarrollo (o minas)	Endógena	Son una medida del conocimiento geológico.
Producción	Endógena	
Informalidad	Endógena	Considera la producción informal
Costos	Endógena y exógena	Existen unos costos exógenos de referencia, sin embargo, debido a economías de escala, los costos pueden cambiar a medida que aumentan las actividades de exploración, producción, etc.

Variable	Tipo	Comentario
Precio	Exógeno	Refleja el comportamiento del mercado internacional y demanda.
Ganancias y renta minera estatal	Endógena	
Inversión necesaria		Se mide la inversión necesaria en el sector para que se dé cierto desarrollo
Tasas de impuestos y regalías	Exógena	Son definidas por el usuario, o UPME, pero no se modifican dentro del modelo.
Impactos ambientales	Endógena	Depende de la producción y nivel tecnológico
Percepción de daños	Endógena	Percepción de daños ambientales
Empleo	Endógena	Depende de la producción
Conflicto social	Endógena	Se consideran conflictos por uso de agua, contaminación, etc.
Atractividad del país	Endógena	Está afectada por múltiples variables: las ganancias del sector, los conflictos, la infraestructura, la corrupción y la estabilidad jurídica, entre otros.
Infraestructura	Exógena	El nivel de infraestructura del país afecta la atractividad pero es exógeno a la industria minera
Seguridad	Exógena	La percepción de seguridad del país no depende del sector minero, pero afecta la atractividad.
Estabilidad jurídica	Exógena	Afecta la atractividad pero depende de factores externos, como ministerios, legisladores, etc.
Regulación ambiental	Exógena	Las normas ambientales las define el estado.
Capacidad de fiscalización	Exógena	Depende de las instituciones y no de la industria minera.
Nivel tecnológico	Exógena	Depende de los avances tecnológicos a nivel mundial. Afecta tasas de contaminación, productividad y costos.
Demanda internacional	Excluida	Esta reflejada en el precio.
Demanda interna del mineral	Exógena	
Sustitutos de minerales	Excluida	No se incluye en el modelo pero se realiza un estudio de perspectivas tecnológicas y sustitutos
Encadenamientos productivos	Exógena	Se incluyen dentro de las demandas internas para evaluar estrategias.

Fuente: Elaboración propia a partir de discusiones con equipo de trabajo UNAL-UPME

A partir de lo anterior se identificaron seis bloques en los que se pueden agrupar las variables, y que conforman la estructura básica del modelo: bloque de producción, que incluye las reservas y la producción informal; bloque financiero, que incluye los criterios de viabilidad económica de una inversión; bloque social, que considera la percepción de la sociedad y conflicto con las comunidades; bloque ambiental, que considera los impactos sobre el medio ambiente; bloque macroeconómico que considera variables como

atractividad país, precios de los minerales, regulaciones e impuestos, etc.; y bloque de encadenamientos productivos, que considera otras industrias que pueden jalonar la demanda interna (siderúrgicas, plantas térmicas, etc.) e industrias que den valor agregado al mineral (joyerías).

4.2.2 Discusión de detalles del modelo

En la discusión sobre los minerales a incluir dentro del modelo se planteó inicialmente considerar todos los minerales estratégicos definidos por el Ministerio de Minas y Energía: oro, platino, cobre, minerales de fosfatos, minerales de potasio, minerales de magnesio, carbón metalúrgico, carbón térmico, uranio, hierro y coltán. Dadas las limitaciones de información y de tiempo de ejecución del proyecto, se discutió durante los diferentes talleres y sesiones de modelamiento la posibilidad de seleccionar algunos minerales con características particulares, y modelar los sistemas más complejos, de tal forma que en un futuro la UPME pueda extender el modelo a otros minerales (Ver anexo 2). De esta forma se seleccionaron:

- Carbón, ya que cuenta con más información y con una cadena de producción menos compleja que los demás. Además se diferencia entre carbón térmico y metalúrgico.
- Oro, ya que es el mineral con mayor conflicto social y ambiental debido a la ilegalidad e informalidad.
- Caliza, está contenido dentro de los materiales de construcción, los cuales presentan algunos conflictos por ilegalidad, y son los minerales con mayores encadenamientos productivos hacia adelante, principalmente en el sector de construcción.

5. Modelo del sector minero en Colombia

En el capítulo anterior se identificó y delimitó el problema del sector minero en Colombia. A partir de esto, en este capítulo se formula una hipótesis dinámica del comportamiento del sistema, obteniendo como resultado un diagrama causal consolidado. Además, se presenta la formulación matemática para cada módulo. La estructura matemática del modelo se presenta en diagramas de niveles y flujos, que permiten observar gráficamente la relación entre las variables y parámetros. La descripción se centra en la estructura genérica, común a todos los minerales, para luego analizar las modificaciones que se incluyen para modelar consideraciones específicas de algunos de ellos. Este modelo se formula en la herramienta de simulación Powersim Studio®.

5.1 Diagrama causal del sector minero en Colombia

Como se mencionó en la sección anterior, el modelo se divide en seis módulos que se relacionan entre sí en un diagrama de bloques, como se muestra en la Figura 16. A partir de estos módulos se ha construido siguiendo la metodología la hipótesis dinámica de comportamiento del sector minero colombiano. La hipótesis dinámica recoge, en la medida que fue posible con las limitaciones de tiempo y espacio, los modelos mentales de comprensión del sector por parte de los funcionarios de la UPME. La hipótesis se describe mediante el uso de un diagrama causal general que luego se desagrega para describir en detalle las relaciones entre los módulos de producción, social y ambiental. Los efectos del módulo financiero, como rentabilidad, afectan directamente la producción, por lo que se modelan dentro del mismo diagrama causal. La atractividad del país, correspondiente al módulo macroeconómico, se interrelaciona con los demás módulos, por lo que se presenta en los diagramas causales de cada módulo. Las variables como porcentaje regalías, impuesto de renta y precio, son exógenas, por lo que afectan a los demás módulos pero no requieren una formulación causal independiente. En módulo de encadenamientos productivos no se modela de forma independiente, pero se incluye dentro de las estrategias que se proponen más adelante.

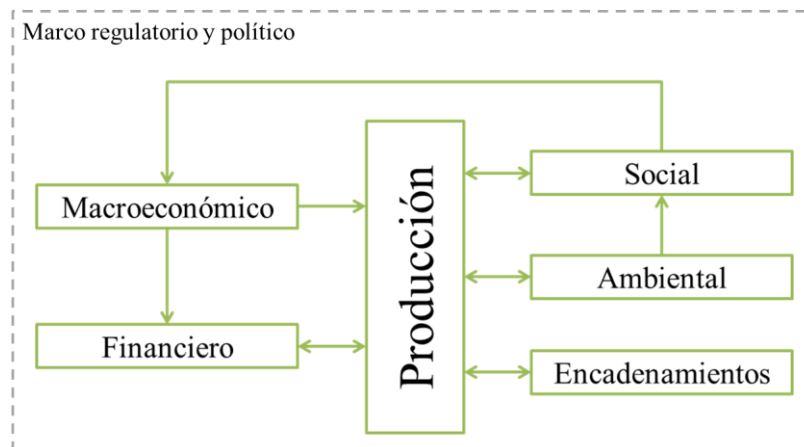


Figura 16 – Diagrama de bloques de modelo del sector minero.

Fuente: Elaboración propia con información del taller 1.

5.1.1 Estructura general

La estructura general del modelo se presenta de forma agregada en la Figura 17. La estructura del modelo se construye a partir de dos ciclos básicos de refuerzo, el ciclo de exploración (R1), y el ciclo de desarrollo (R2). Los recursos geológicos creados de forma natural (recurso natural no renovable), y distribuidos a lo largo del país, poseen un potencial económico, por lo que existe un interés por explotarlos. Para conocer dichos recursos, se requiere realizar actividades de exploración que permitan conocer la localización de dichas reservas; a mayor exploración se poseen mayores reservas probadas, y a su vez es posible tener mayores reservas en desarrollo, lo que lleva a una mayor producción. Esta estructura parte del modelo desarrollado por Naill(1992) para descubrimiento de reservas de gas natural en los Estados Unidos y se ha ajustado para el sector minero colombiano de acuerdo con el conocimiento y discusiones dentro de la UPME.

La producción tiene también como incentivos las expectativas de precios, las decisiones de inversión se toman con base en el precio esperado del mineral (cuando el precio real aumenta, se espera que el precio siga en aumento, y viceversa). Como resultado de una mayor producción, se reducen los costos unitarios de operación debido a la presencia de economías de escala en esta industria, causando una reducción de los costos totales, los cuales pueden verse aumentados con un aumento de la tasa impositiva tributaria. Unos costos totales relativamente bajos, se ven reflejados en mayores ganancias netas, las cuales también crecen con el aumento de los precios. Las ganancias netas de la industria minera permiten realizar inversión en nuevas exploraciones con el fin de aumentar las reservas en desarrollo y la exploración. Sin embargo, esta inversión también se ve afectada por las expectativas de precios, y otros dos ciclos que se explican a continuación.

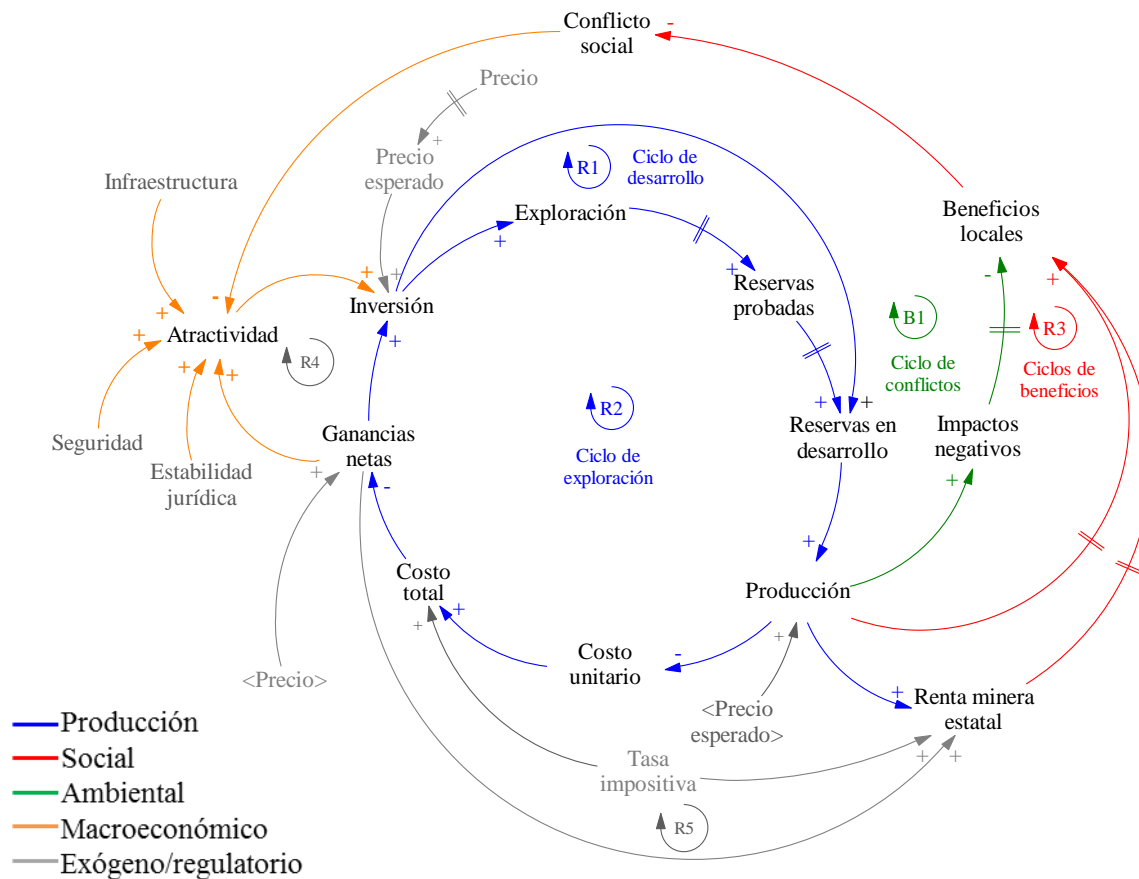


Figura 17 – Diagrama causal general del sector minero.

Fuente: Elaboración propia con información de talleres 1 y 2, y sesiones de modelamiento entre grupo de trabajo UNAL-UPME

Además de los ciclos de exploración, y desarrollo, el modelo considera dos ciclos complementarios: un ciclo que representa los beneficios de la minería (refuerzo) y un ciclo que involucra los conflictos generados por la misma (Balance). El ciclo de beneficios es un ciclo de refuerzo (R3) que surge de los efectos positivos generados por la renta minera estatal -que crece cuándo aumentan la producción, las ganancias de las firmas mineras, y la tasa impositiva tributaria- y la producción, tales como: renta local, inversión en infraestructura local, generación de empleos, etc. Por su parte el ciclo de conflictos, es un ciclo de balance (B1) que se contrapone al ciclo de beneficios mostrando las externalidades negativas de la producción minera, como la contaminación ambiental.

Tanto los efectos negativos como positivos se consolidan en la variable beneficios locales, que refleja la conformidad de la sociedad o los efectos netos de la actividad minera. La variable de beneficios locales afecta el conflicto social, entre menos beneficios perciben los ciudadanos se tenderá a aumentar el conflicto;

entre más beneficios se perciban, menor será el conflicto social. Un aumento del conflicto social disminuirá la atractividad del país, mientras que las ganancias netas, tendrán un efecto positivo sobre esta. Otros factores que afectan la atractividad son el efecto de la infraestructura, el efecto de la seguridad, y el efecto de la estabilidad jurídica, como lo sugiere el instituto *Fraser* (Wilson & Cervantes, 2014). Finalmente esta atractividad influirá la decisión de inversión en el país. La atractividad está inspirada en *Fraser*; pero se hacen los ajustes del caso dadas las condiciones del modelo.

5.1.2 Módulo de producción

El modelo de producción se centra en la explotación de los recursos, como se muestra en la Figura 18. Para ello se parte de la diferencia entre reservas probadas y reservas en desarrollo. Las reservas probadas son aquellas descubiertas debido a actividades de exploración; a mayor exploración, se conocen mayores reservas después de un tiempo. Sin embargo dichas reservas no son explotables directamente y es necesario invertir en capacidad e infraestructura para volverlas reservas en desarrollo o minas, lo que toma cierto tiempo. Así, a mayores reservas probadas se tendrán mayores reservas en desarrollo después de un tiempo, y por ende mayor producción.

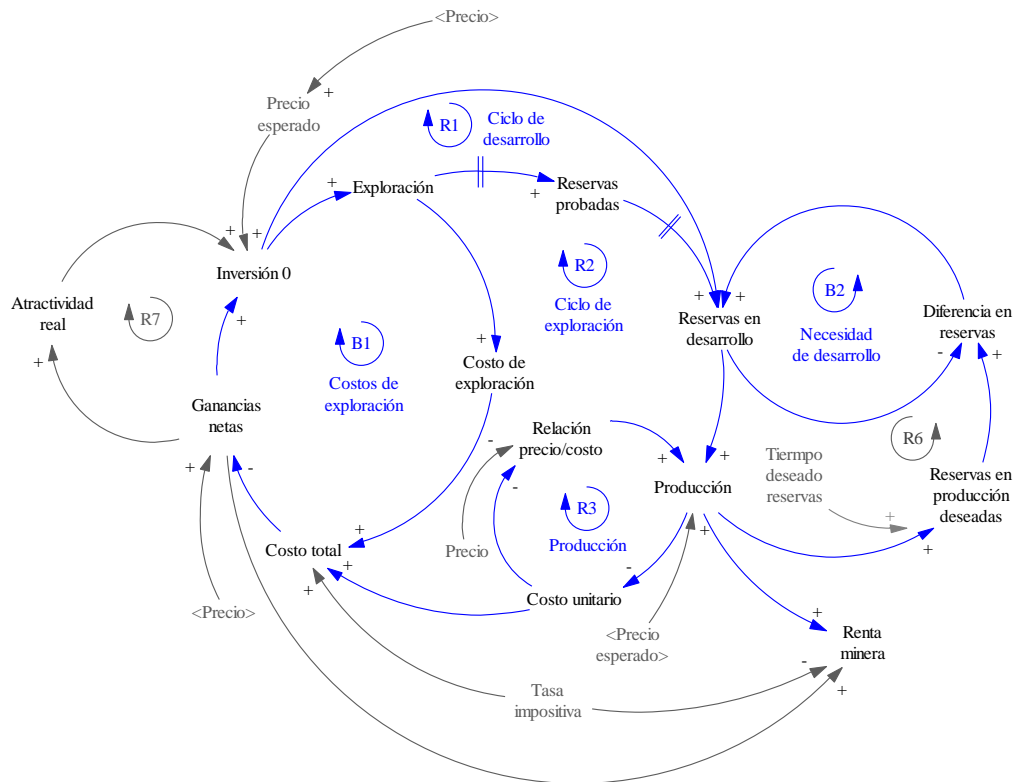


Figura 18 – Diagrama causal del módulo de producción.

Las variables y líneas grises son variables y relaciones exógenas al módulo de producción.

Fuente: Elaboración propia con información de talleres 1 y 2, y sesiones de modelamiento entre grupo de trabajo UNAL-UPME

Para el modelo se consideran las economías de escala, de manera que entre mayor sea la producción menor será el costo unitario de operación, lo que aumentará la relación precio/costo e incentivará una mayor producción (ciclo R3). De igual forma, los costos unitarios afectan directamente los costos totales. Las ganancias netas dependen tanto del precio como de los costos totales, y a mayores ganancias se podrá aumentar la inversión en desarrollo y exploración (R1 y R2).

Haciendo un contrapeso a estos ciclos de refuerzo surgen dos ciclos de balance. Uno es producto de los costos de exploración (B1), el cual parte del supuesto de que primero se exploran los sitios más económicos (Naill, 1992), por lo que cada vez es más costoso explorar, aumentando así los costos totales. El otro, denominado “Necesidad de desarrollo” (B2), representa la necesidad de desarrollar nuevas reservas, la cual depende de las reservas deseadas. Si la diferencia entre las reservas reales y las deseadas es grande, es necesario invertir en exploración para alcanzar dicho nivel deseado. Las reservas deseadas son las reservas necesarias para cubrir la producción durante determinado tiempo, y se calculan como el producto entre la producción y un tiempo deseado.

5.1.3 Módulos social y ambiental

El comportamiento dinámico de los componentes sociales y ambientales depende directamente de la producción del mineral, lo cual presenta los principales retos para la industria minera. Las variables que se consideran en este estudio fueron seleccionadas a partir de los talleres de modelamiento, buscando un balance sobre lo que pueden ser indicadores a nivel país agregado. Las variables finalmente seleccionadas son empleo, calidad de vida, impactos negativos por contaminación ambiental, y uso de recursos naturales, como se muestra en la Figura 19. Cada una de estas variables influye directamente en el conflicto social, que a su vez afecta de forma negativa la atractividad del país. Esta estructura se replica para cada mineral, de manera que la atractividad del país es el resultado del agregado de diferentes minerales. Dicho conflicto representa la presión de las comunidades y las organizaciones sociales que se oponen a la minería.

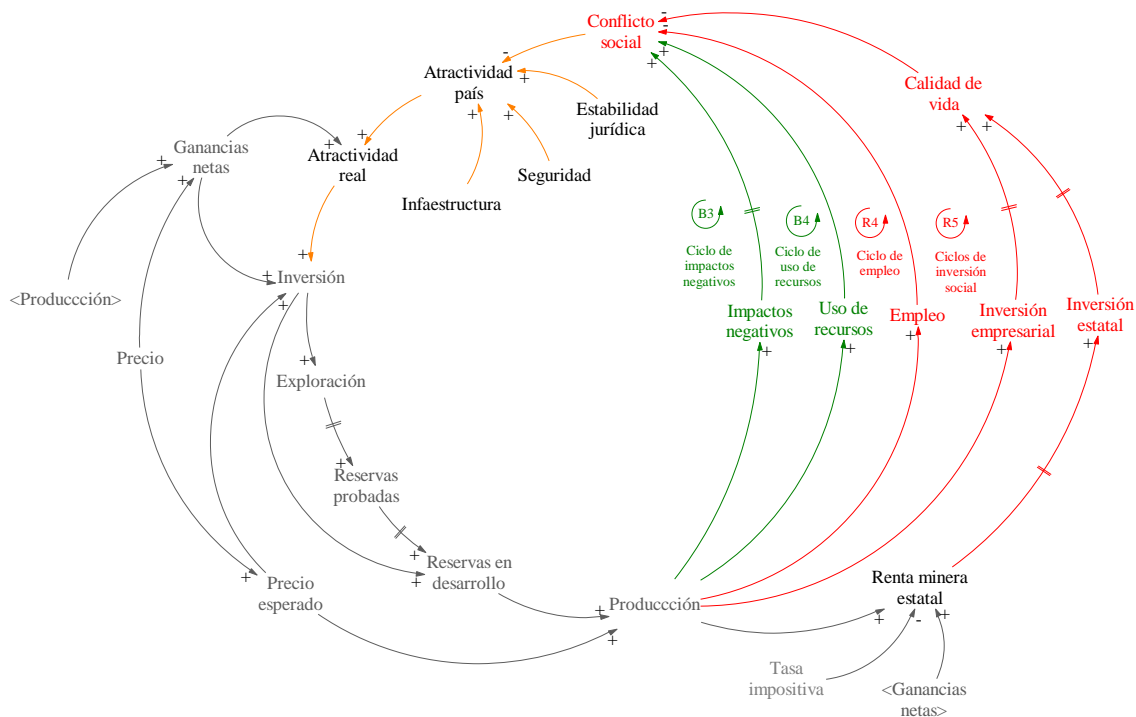


Figura 19 – Diagrama causal de los módulos social, ambiental, y macroeconómico.

Las variables y líneas grises, son variables y relaciones exógenas a estos módulos.

Fuente: Elaboración propia con información de talleres 1 y 2, y sesiones de modelamiento entre grupo de trabajo UNAL-UPME

Este módulo está conformado por dos ciclos de balance, es decir, un aumento en la producción desencadenará una serie de efectos sobre otras variables que terminarán por reducir la producción en el largo plazo. El primero de esos ciclos es el ciclo de impactos negativos (B3), el cual considera todos los impactos negativos en el ambiente asociados a la minería, como la acidificación de aguas, el vertimiento de sustancias químicas en fuentes hídricas, y la emisión de material particulado al aire. Un aumento en la producción provoca un aumento en la contaminación. La percepción de daños depende de la diferencia entre la contaminación permisible y la contaminación real. Estos daños, toman un tiempo considerable en ser percibidos. Finalmente, un aumento en la percepción de estos, también aumenta el conflicto social (Wagner, 2008).

El segundo ciclo de balance es el ciclo del uso de los recursos (B4), el cual representa la competencia de la minería por el uso de recursos como el agua, con otros sectores de la economía como el agrícola. Un aumento en la producción se verá reflejado en un mayor uso de agua. La diferencia entre el agua que utiliza la minería y el agua que usan otros sectores con uso intensivo de agua -como la agricultura- determinará la generación de conflictos de forma tal que si la minería usa más agua que los otros sectores, el conflicto aumentará, y

viceversa (Miranda, O., M. Liotta, A. Olguin, 2010). Un aumento en el conflicto causa a su vez una disminución de la atractividad, la cual disminuirá la inversión extranjera directa, y a su vez las inversiones en exploración y en desarrollo, disminuyendo así la producción.

Los dos ciclos restantes, son de refuerzo, es decir, un aumento en la producción desencadena una serie de efectos sobre otras variables que terminan por aumentar la producción en el largo plazo. El primero de ellos es el ciclo de empleo (R4). Un aumento en la producción causa un aumento del empleo, ya sea directamente en la empresa minera o a través de las industrias alrededor de la minería (Ortiz & Londoño, 2013). El conflicto con las comunidades se genera cuando no se cumplen las expectativas de empleo. Mientras mayor sea la diferencia entre los empleos reales y los empleos esperados, mayor será el conflicto (ver Figura 20). Un aumento en el conflicto social reduce la atractividad, que debido a la relación positiva de la atractividad con la exploración y con el desarrollo, implicará finalmente una disminución de la producción.

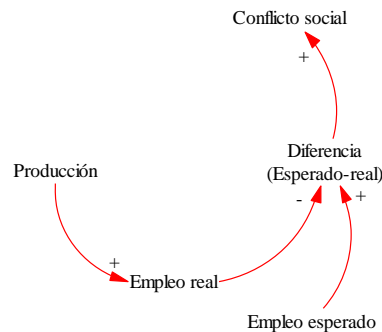


Figura 20 – Detalle de causalidad en conflicto social.

Fuente: Elaboración propia con información de talleres 1 y 2, y sesiones de modelamiento entre grupo de trabajo UNAL-UPME

Finalmente, existe además otro efecto positivo de la producción es la calidad de vida. Esta variable está conformada por dos componentes: la inversión estatal, producto de la renta minera (regalías e impuestos), y la inversión empresarial (o acciones de responsabilidad social). Generalmente, las empresas invierten en las comunidades directamente afectadas para disminuir las tensiones existentes (Tanaka et al., 2007), también conocido como Responsabilidad Social Empresarial. El efecto de la inversión social en la atractividad depende de la diferencia entre la inversión real en las comunidades y la inversión esperada, si la diferencia es grande el conflicto será mayor (R4).

5.1.4 Módulo macroeconómico – Atractividad

La atractividad en este modelo se entiende como el poder de atracción de capital extranjero de largo plazo por parte de la minería (Wilson & Cervantes, 2014). La Figura 19 muestra como la atractividad del país para la inversión en la industria minera depende de los efectos de: infraestructura, seguridad, y estabilidad jurídica, como lo sugiere el instituto *Fraser* (Wilson & Cervantes, 2014), y del conflicto social. Un aumento del conflicto social disminuirá la atractividad del país, mientras que un aumento de la infraestructura, la seguridad, y la estabilidad jurídica, se verán reflejados en un mayor atractividad país. Sin embargo, la atractividad realmente percibida por las empresas dependerá de esta atractividad país, y de las ganancias netas. A mayores ganancias netas, como a una mayor atractividad país, mayor será la atractividad real del negocio minero en el país. La operacionalidad del índice está presente en detalle en la presentación del modelo formal, pues existen consideraciones importantes en términos de desagregación y estimación. Esta formulación de este índice está inspirado en el índice *Fraser*. En el presente estudio se propone la formulación de una atractividad para cada mineral modelado, pues los inversionistas evalúan, además del país, los conflictos particulares de la región rica en determinado recurso.

5.1.5 Hipótesis dinámica consolidada

A partir de los diagramas de cada módulo es posible construir un diagrama detallado del sistema completo, como se muestra en la Figura 21. El modelo consolidado muestra los principales ciclos de realimentación, de los cuales son cuatro ciclos de refuerzo: desarrollo (R1), exploración (R2), producción (R3), empleo (R4) e inversión social (R5); y cuatro ciclos de balance: costos de exploración (B1), necesidad de desarrollo (B2), impactos negativos (B3) y uso de recursos (B4). A partir de la estructura causal de un sistema se pueden plantear hipótesis sobre el comportamiento esperado, y pasar a tener un modelo formal que permita la realización de experimentos de simulación (Morecroft, 2007; Sterman, 2000). Es posible observar periodos de crecimiento en la actividad gracias a los ciclos de refuerzo, y periodos de estabilización o incluso reducción de la actividad, debido a los ciclos de balance. Adicionalmente, los retardos del sistema pueden llevar a observar oscilaciones en el comportamiento.

Por medio de la visión general del sistema, se puede proceder a primero construir el modelo formal y luego simular las políticas formuladas para el fomento el desarrollo del sector minero. Las simulaciones permiten mirar el aumentando (o disminución) la producción y la renta minera del país, pero observando los efectos colaterales de la minería, que pueden llevar a un detrimento del sector en el largo plazo.

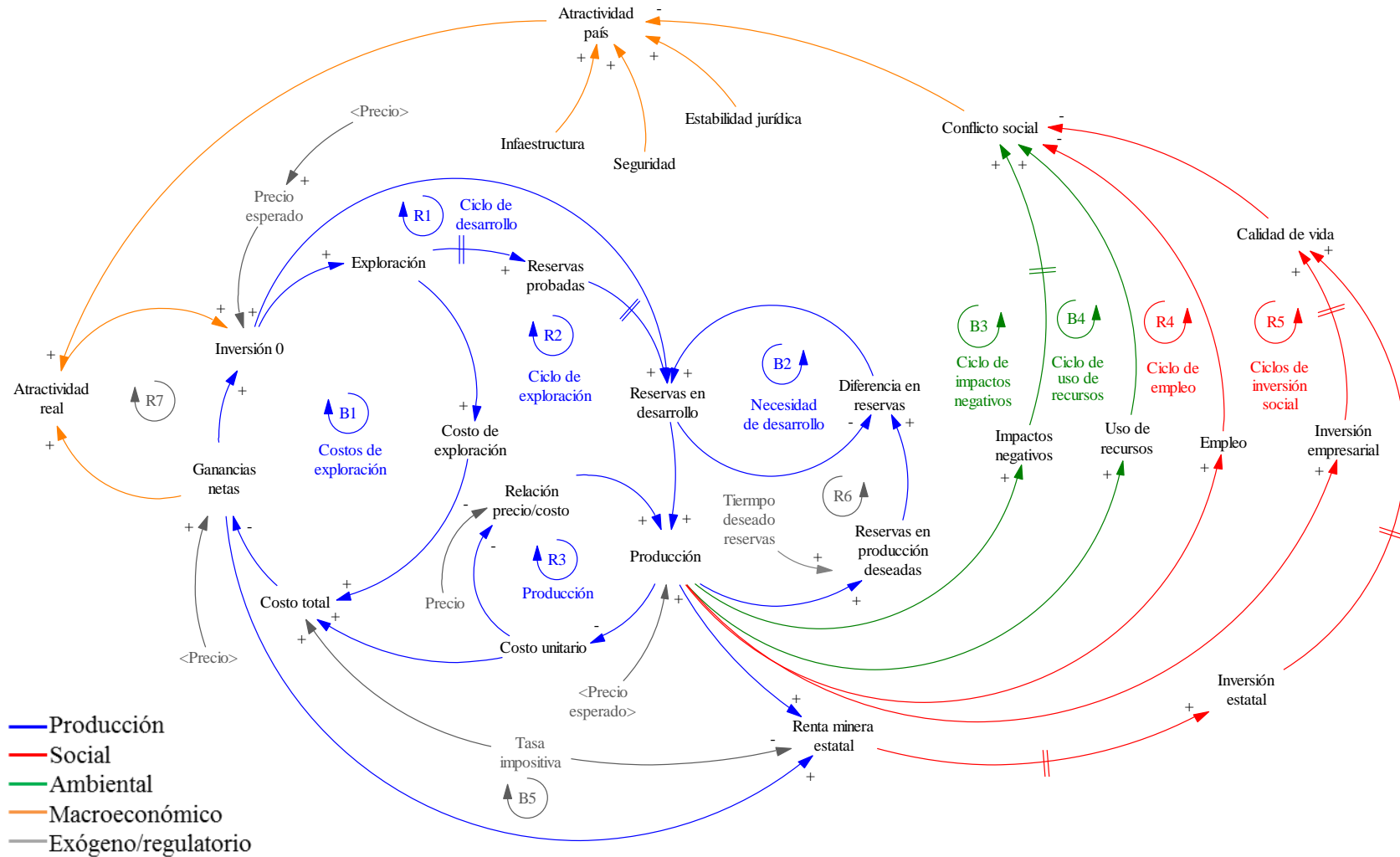


Figura 21 – Diagrama causal detallado del sector minero.

Fuente: Elaboración propia con información de talleres 1 y 2, y sesiones de modelamiento entre grupo de trabajo UNAL-UPME

5.2 Módulo de producción

En el módulo de producción se representa la dinámica del ciclo minero partiendo de la estimación de reservas probadas a partir de la exploración y siguiendo con el desarrollo de las reservas probadas y la producción y beneficio de minerales. Las inversiones a lo largo de este ciclo permiten aprovechar de forma económica los recursos minerales del subsuelo y este aprovechamiento depende del nivel tecnológico. Estas relaciones se resumen en la Figura 18 y Figura 19 de este informe.

Los recursos y reservas minerales se pueden clasificar en diferentes tipos según la viabilidad económica y el grado de incertidumbre de su potencial. El *Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards* (CRIRSCO) clasifica los recursos y reservas de minerales como se muestra en la Figura 22. A medida que aumenta la viabilidad económica se pasa de recurso a reserva, y a medida que aumenta la certeza del potencial se pasa de recurso inferido a recurso indicado o medido, esta nomenclatura varía según factores modificadores como lo son factores legales o de gobierno.

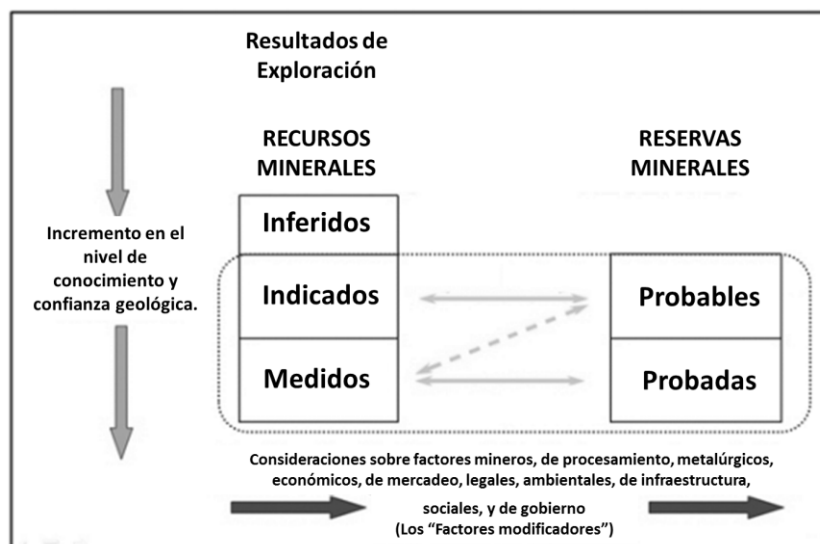


Figura 22 – Clasificación de recursos en el presente estudio.

Fuente: (CRIRSCO, 2013)

Dado el horizonte temporal de este análisis, este estudio se enfoca en el desarrollo de los recursos que ya han sido ubicados y se identificaron como aprovechables de forma económica con las condiciones tecnológicas actuales. Estos recursos se denominan reservas y se clasifican en tres niveles excluyentes entre sí: (i) “reservas probables”; (ii) “reservas probadas”, y (iii) reservas en desarrollo.

Las reservas probables son aquellas se conocen, pero tienen algún grado de incertidumbre sobre la cantidad de mineral real disponible, pues no se han realizado medidas detalladas del mismo. Las reservas probadas

son las extraíbles con la tecnología actual e incluyen tanto las reservas para las cuales ya se instaló infraestructura de producción como las que están estimadas y pueden desarrollarse en el futuro. Para representar esta distinción, se definen reservas en desarrollo como las reservas probadas que se encuentran disponibles para explotación; es decir, aquellas que cuentan con infraestructura adecuada y de las cuales se obtienen beneficios económicos directos por su explotación.

Las demás reservas probadas se agrupan en el nivel del mismo nombre. Cada nivel de reservas se representa como una ecuación diferencial dependiente del tiempo, que se modifica según los flujos de entrada y de salida, como se muestra Figura 23 y en la Tabla 13.

Los niveles mencionados se relacionan por medio de cuatro flujos principales: nuevas reservas probables, tasa de descubrimiento, tasa de desarrollo y producción titulada. La formulación de cada uno de estos flujos se describe a continuación.

- Nuevas reservas probables: la entrada de nuevas reservas probables refleja el resultado de la exploración y permite aumentar la cantidad de reservas probables. Este flujo se modela como una función constante y puede modificarse si aumenta el conocimiento geológico.
- Tasa de descubrimientos: esta tasa indica el paso de reservas probables a reservas probadas, y depende de los nuevos descubrimientos requeridos. Se asume que la industria invierte en exploración con el fin de alcanzar una meta de reservas a largo plazo y dependiendo de la atractividad del mineral en el país. La decisión de inversión en exploración se explica en el módulo financiero y depende de la rentabilidad la cual se representa por medio de la relación precio/costo.
- Tasa de desarrollo de reservas: esta tasa indica el paso de reservas probadas a reservas en desarrollo (minas). Al igual que la tasa de descubrimientos, esta tasa de desarrollo depende de la decisión de inversión en desarrollo, del nuevo desarrollo requerido (según meta de reservas de corto plazo) y de la atractividad del mineral en el país.
- Producción titulada: indica la extracción legal y formal del mineral, este flujo disminuye las reservas en desarrollo y depende de una decisión a corto plazo basada en la relación entre el precio esperado y costos de operación, además está delimitada por la capacidad de producción. Para el oro, las variables “producción titulada” y “capacidad de producción” incluyen el beneficio y su eficiencia.

Las ecuaciones que describen estas variables se presentan en la Tabla 13.

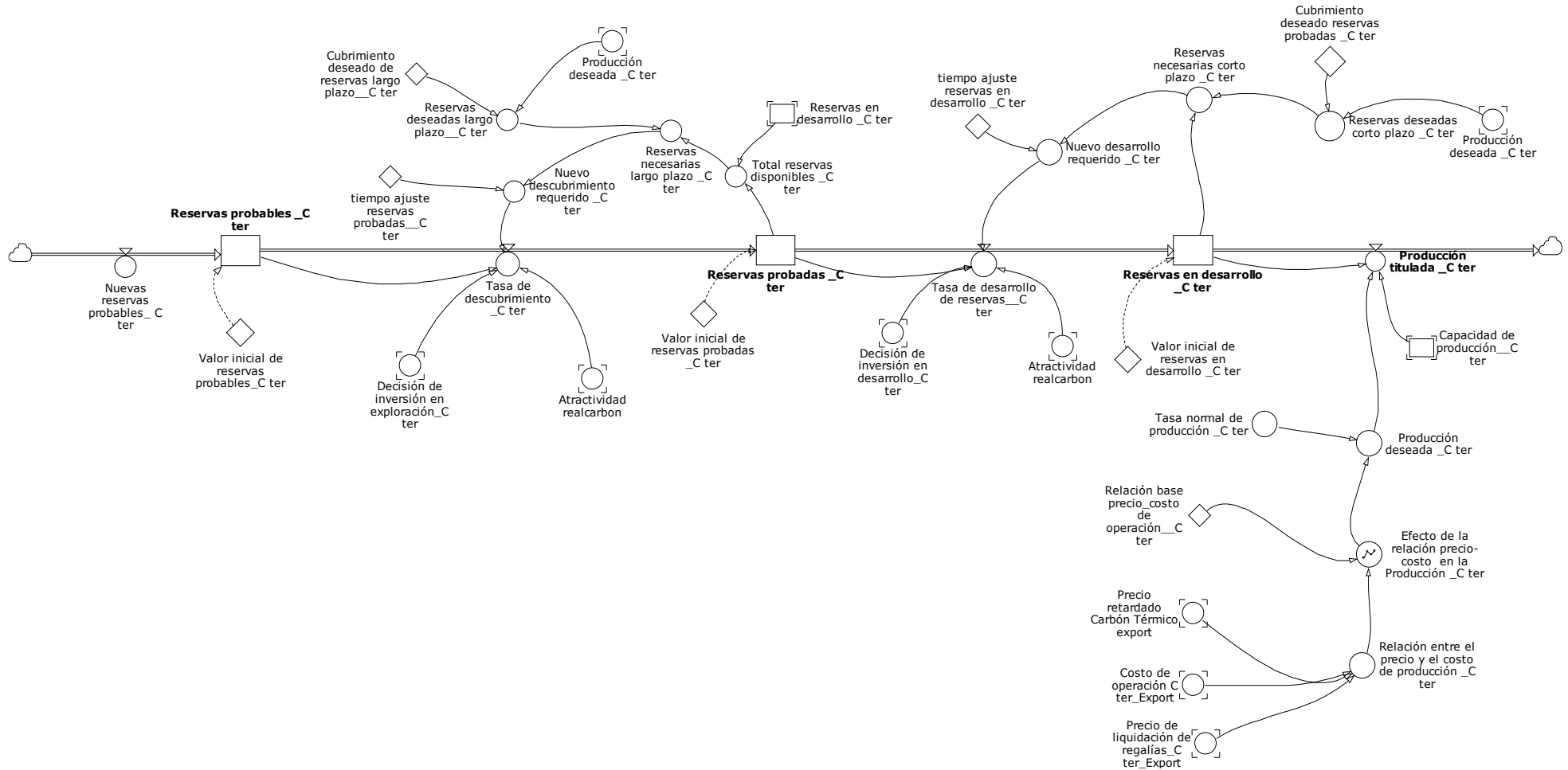


Figura 23 – Diagrama de flujos y niveles del módulo de producción.
 Diagrama para carbón térmico. Esta estructura se replica para los demás minerales
Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME.

La estructura descrita anteriormente representa la estructura base para modelar cada uno de los módulos de producción de los minerales seleccionados. Adicionalmente, debido a características específicas de cada uno de los sistemas, se incluyen las siguientes estructuras adicionales.

Carbón

En el módulo de producción de carbón se incluye una diferenciación entre producción en el interior del país y producción en la región Caribe (o producción de exportación). La producción en el interior es igual a la demanda interna de carbón (exógena), y el resto de carbón producido se destina a exportaciones. Los diagramas de estas producciones se muestran a continuación.

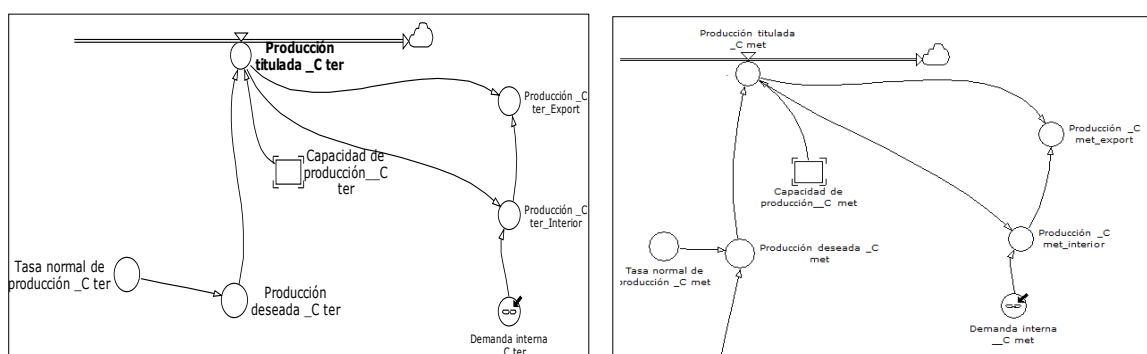


Figura 24 – Detalle de diagramas de producción de carbón.

Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME

Oro

Para el oro se tienen también dos tipos de producción: producción titulada y producción informal. Se tiene un nivel de Unidades de Producción Minera No titulada (UPM-No titulada), que extraen mineral de forma ilegal de las reservas probadas, a una eficiencia menor que la titulada y con mayores impactos ambientales. Estas UPM No tituladas aumentan con la atractividad de la actividad minera y disminuyen con los programas de legalización y titularización (Goñi Pacchioni, Sabogal Moreno, & Asmat, 2014). Estas ecuaciones se presentan también en la Tabla 13.

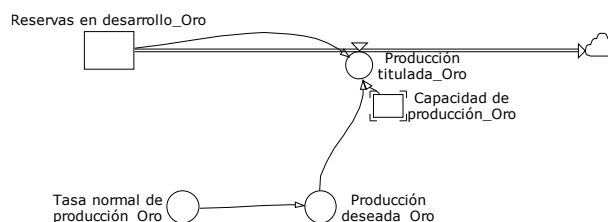


Figura 25 – Detalle de diagrama de producción formal de oro.

Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME

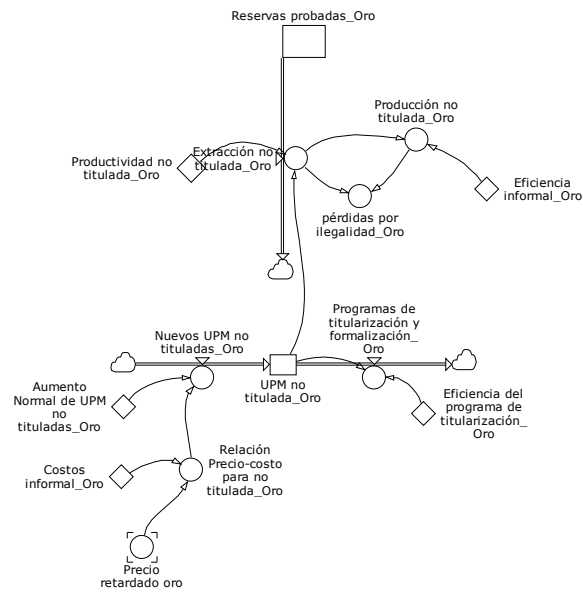


Figura 26 – Detalle de diagrama de producción informal de oro.

Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME

Caliza:

La producción de caliza se encuentra jalonada principalmente por la demanda interna del material (exógena) y, aunque actualmente no hay exportaciones, en el futuro podrían darse. Esta demanda interna sustituye la producción deseada que se tiene en el modelo genérico.

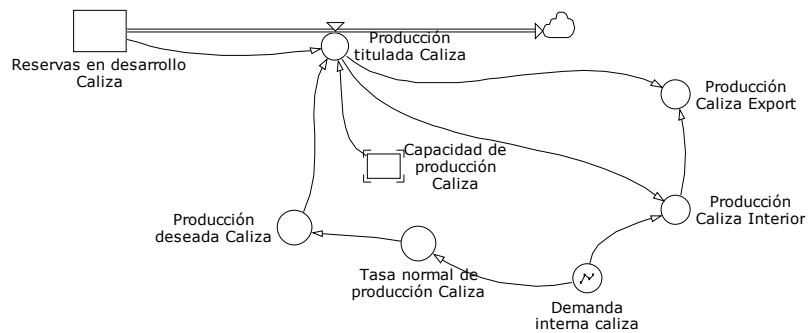


Figura 27 – Detalle de diagrama de producción informal de caliza.

Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME

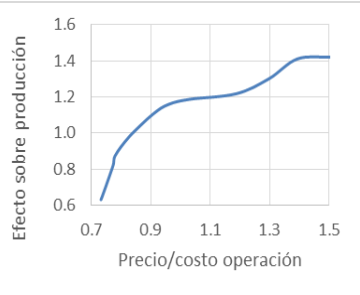
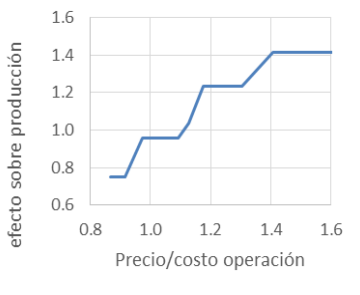
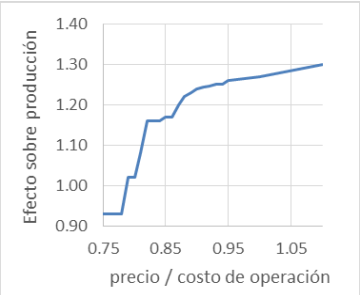

Tabla 13 – Variables y ecuaciones del módulo de producción.
Las ecuaciones se repiten para cada mineral, excepto en aquellas que se hace la salvedad

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN/DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
PRODUCCIÓN TITULADA					
Flujo	Nuevas reservas probables	Mton/año		100	Supuesto
Nivel	reservas probables	Mton	Áreas delimitadas por actividades de exploración, sobre las que se tiene un alto grado de incertidumbre respecto a la cantidad de mineral, mas no a la presencia del mismo.	Reservas probables (t-1) + (Nuevas reservas probables - Tasa de descubrimiento)*dt	Basado en (Naill, 1992) (CRIRSCO, 2013)
Parámetro	Valor inicial de reservas probables	Mton o Ton	Diferente para cada mineral. Valor estimado de reservas probables en el año inicial de la simulación	Carbón térmico:1765 <<Mton>> Carbón metalúrgico:321.8 <<Mton>> Oro: 965.5 <<Ton>> Caliza: 1000<<Mton>>	Basado en (Wood Mackenzie, 2014) e información de la Tabla 8
Parámetro	Tiempo de ajuste de reserva	Año	Supuesto sobre el tiempo en que se demora el sector minero en cumplir con el requerimiento de nuevos descubrimientos.	10	Supuesto
Flujo	Tasa de descubrimiento	Mton/año	Cantidad de mineral que pasa cada año de reservas probables a reservas probadas, es decir, aquellas reservas sobre las que aumenta la certeza debido a actividades de descubrimiento.	MIN(Nuevo descubrimiento requerido ,Reservas probables /TIMESTEP)*Decisión de inversión en exploración*Atractividad real	Basado en (Naill, 1992)
Parámetro	Cubrimiento deseado de reservas largo plazo	Año	Tiempo esperado de duración de las reservas en la actividad minera a largo plazo. Se asocia con grandes proyectos mineros que abarcan desde la exploración hasta la explotación del mineral.	50	Supuesto
Auxiliar	Reservas deseadas largo plazo	Mton	Cantidad de mineral necesaria para mantener la actividad minera durante los años del cubrimiento deseado de reservas a largo plazo a la tasa de producción actual.	Producción deseada *Cubrimiento deseado de reservas largo plazo_	Propuesta por equipo de trabajo

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN/DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
Auxiliar	Nuevo descubrimiento requerido	Mton/año	La cantidad de mineral necesario para igualar las reservas probadas actuales y las reservas necesarias a largo plazo, teniendo en cuenta el tiempo de ajuste de reservas.	Reservas necesarias largo plazo /tiempo ajuste reservas probadas_	Propuesta por equipo de trabajo basado en (Naill, 1992)
Auxiliar	Reservas necesarias largo plazo	Mton	La diferencia entre la cantidad de reservas en desarrollo actuales y la cantidad de reservas deseadas a largo plazo.	MAX(Reservas deseadas largo plazo-Total reservas disponibles,0<<ton>>)	Propuesta por equipo de trabajo
Auxiliar	Total reservas disponibles	Mton	La cantidad total de los niveles reservas probadas, incluye tanto las que se encuentran en desarrollo como las que no.	Reservas en desarrollo +Reservas probadas	Propuesta por equipo de trabajo
Nivel	Reservas probadas	Mton	Reservas sobre la que se tiene certeza pero que carecen de infraestructura e inversión para la explotación directa del mineral	-Tasa de desarrollo de reservas + Tasa de descubrimiento	(Naill, 1992)
Parámetro	Valor inicial de reservas probadas	Mton	Valor estimado para las reservas Probadas de carbón en el año inicial	Carbón térmico: 1972.39 <<Mton>> Carbón metalúrgico: 278.18 <<Mton>> Oro: 1351.6 <<Ton>> Caliza: 912.1 <<Mton>>	Basado en (Wood Mackenzie, 2014) y criterio de expertos
Flujo	Tasa de desarrollo de reservas	Mton/año	Cantidad de reservas por año que pasan de ser reservas probadas a reservas en desarrollo. Son aquellas reservas que cuentan con una inversión en infraestructura y pueden ser explotadas.	MIN(Nuevo desarrollo requerido ,Reservas probadas /TIMESTEP)*Decisión de inversión en desarrollo*Atractividad real	(Naill, 1992)
Auxiliar	Nuevo desarrollo requerido	Mton/año	La cantidad de mineral necesario para igualar las reservas actuales en desarrollo y las reservas necesarias a corto plazo, teniendo en cuenta el tiempo de ajuste de reservas en desarrollo.	Reservas necesarias corto plazo /tiempo ajuste reservas en desarrollo	Propuesta por equipo de trabajo basado en (Naill, 1992)
Parámetro	Tiempo de ajuste de reserva en desarrollo	Año	Supuesto sobre el tiempo en que se demora el sector minero en cumplir con el requerimiento de nueva infraestructura para reponer las reservas en desarrollo.	5 <<yr>>	Supuesto

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN/DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
Auxiliar	Reservas necesarias corto plazo	Mton	La diferencia entre la cantidad de reservas en desarrollo actuales y la cantidad de reservas deseadas a corto plazo.	MAX(Reservas deseadas corto plazo -Reservas en desarrollo ,0<<ton>>)	Propuesta por equipo de trabajo
Nivel	Reservas en desarrollo	Mton	Son aquellas reservas que cuentan con la infraestructura necesaria para la explotación directa del material	-Producción titulada +Tasa de desarrollo de reservas_	Basado en (Naill, 1992)
Parámetro	Valor inicial de reservas en desarrollo	Mton o ton	Diferente para cada mineral. Valor para las reservas Probadas que se encuentran en explotación (minas) en el año inicial de la simulación	Carbón térmico: 1583.65 <<Mton>> Carbón metalúrgico: 914.27 <<Mton>> Oro: 579 <<Ton>> Caliza: 390.9 <<Mton>>	Basado en (Wood Mackenzie, 2014) e información de la Tabla 8
Parámetro	Cubrimiento deseado de reservas probadas	Año	Tiempo esperado de duración de las reservas en desarrollo. Se relaciona con una planeación de corto plazo, y se enfoca en aquellas reservas en producción.	10	Supuesto
Auxiliar	Reservas deseadas corto plazo	Mton	Cantidad de mineral necesaria para mantener la actividad minera durante los años del cubrimiento deseado de reservas a corto plazo a la tasa de producción actual	Cubrimiento deseado reservas probadas *Producción deseada	Propuesta por equipo de trabajo basado en (Naill, 1992)
Flujo	Producción titulada	Mton/año	Cantidad de mineral extraída por año de las reservas, por empresas con título minero.	MIN(MIN(Capacidad de producción, Producción deseada),Reservas en desarrollo /TIMESTEP)	basado en (Naill, 1992)
Auxiliar	Producción Exportación	Mton/año	Cantidad de mineral que sobra luego de cubrir la demanda interna, y que es exportado.	Producción titulada - Producción _Interior	Propuesta por equipo de trabajo
Auxiliar	Producción Interior	Mton/año	Cantidad del total de mineral extraído que se destina a suplir la demanda interna.	MIN(Demanda interna _,Producción titulada)	Propuesta por equipo de trabajo
Auxiliar	Demanda interna	Mton/año	Demanda de mineral en el interior del país para diferentes actividades económicas. Se toma valor histórico y pronósticos de demanda. No aplica para oro	GRAPHLINAS(TIME,ST ARTTIME,1<<año>>,CONCAT(Histórico Demanda interna, Pronóstico Demanda interna))	Propuesta por equipo de trabajo
Parámetro	Histórico demanda interna	Mton/año	Datos históricos sobre la demanda interna de mineral, entre los años 2000 y 2013 No aplica para oro		SIMCO (UPME, 2014)

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN/DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
Parámetro	Pronóstico demanda interna	Mton/año	Pronósticos de demandas futuros años 2014-2032,	(Ver capítulo de escenarios)	
Auxiliar	Tasa normal de producción	Mton/año	Diferente para cada mineral. Promedio ajustado de la producción histórica	Carbón térmico: 63.18 <<Mton/yr>> Carbón metalúrgico: 3.183 <<Mton/yr>> Oro: 40.51 <<Ton>> Caliza: Demanda interna caliza	Carbón y oro: Calculado de datos históricos. Caliza: Ecuación propuesta por equipo de trabajo
Auxiliar	Producción deseada	Mton/año	Producción que se espera según los datos del precio y el costo	Tasa normal de producción *Efecto de la relación precio-costo en la Producción	Propuesta por equipo de trabajo
	Relación base precio-costo de operación	Adim	Rentabilidad promedio del sector minero en economías emergentes	1.54	(Damodaran, 2014a)
Auxiliar	Relación entre el precio y el costo de producción	Adim	Indicador de rentabilidad. Mide que porcentaje de los costos se ven cubierto por el precio actual del mineral.	Precio retardado export/(Costo de operación Export + Precio de liquidación de regalías _Export)	Propuesta por equipo de trabajo
Flujo	Ampliación de capacidad	Mton/año ²	Aumento en la capacidad de producción	DELAYMTR(MAX(Depreciación+(Producción deseada -Capacidad de producción)/tiempo ajuste cap,0<<gr/año^2>>),6<<mo>>,1)	Propuesta por equipo de trabajo
Parámetro	Tiempo de ajuste de la capacidad	año	Tiempo necesario para realizar un aumento en la capacidad de producción actual	0.5	Criterio de expertos en minería
Nivel	Capacidad de producción	Mton/año	Cantidad máxima de producción del mineral por año, debido a la limitación de las minas.	Capacidad de producción (t-1) + (Ampliación de capacidad - Depreciación)*dt	Propuesta por equipo de trabajo
Flujo	Depreciación	Mton/año ²	Desgaste natural de la maquinaria y equipo.	Capacidad de producción /Vida útil capacidad	Propuesta por equipo de trabajo

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN/DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
Parámetro	Vida útil Capacidad	Año	Número de años que especifican el tiempo de duración de la maquinaria	20	Criterio de expertos en minería
Auxiliar	Efecto de la relación precio-costo en la producción	Adimensional	<p>Variación porcentual en la producción según la atractividad generada por la relación precio/costo según un punto de referencia. Varía según el mineral Función “GRAPHLINAS”</p> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%;"> <p>Carbón térmico:</p>  </div> <div style="width: 50%;"> <p>Carbón metalúrgico:</p>  </div> <div style="width: 50%;"> <p>Oro:</p>  </div> <div style="width: 50%;"> <p>Caliza:</p>  </div> </div>		Calibrado con datos históricos
PRODUCCIÓN NO TITULADA DE ORO					

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN/DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
Parámetro	Productividad no titulada Oro	gr/(año*UPM)	Cantidad de mineral que es capaz de producir una unidad de producción minera no titulada en un año. Dado el tamaño y el equipamiento de las UPM no tituladas, esta suele ser menor que las de UPM tituladas.	0.0037	(Goñi Pacchioni et al., 2014)
Flujo	Extracción no titulada Oro	gr/año	Cantidad total de mineral extraída en un año por las UPM no tituladas de las reservas probadas. Incluye tanto el mineral extraído correctamente como las pérdidas por malas prácticas.	Productividad no titulada Oro*UPM no titulada Oro	Propuesta por equipo de trabajo
Auxiliar	Producción no titulada Oro	gr/año	Cantidad de material efectivo con el que quedan las UPM no tituladas, y que vende a terceros	Eficiencia informal Oro*Extracción no titulada Oro	Propuesta por equipo de trabajo
Auxiliar	Pérdidas por ilegalidad Oro	gr/año	Cantidad de mineral que no logra ser explotado o que se pierde en el proceso de extracción, debido a las condiciones precarias de las UPM no tituladas	Extracción no titulada Oro-Producción no titulada Oro	Propuesta por equipo de trabajo
Parámetro	Eficiencia informal Oro	Adimensional	El porcentaje entre la cantidad de mineral explotado y el mineral total resultante de la actividad minera que se puede vender a terceros.	0.6	(Goñi Pacchioni et al., 2014)
Flujo	Nuevas UPM no tituladas-Oro	UPM/año	Creación de nuevas UPM por año	Aumento Normal de UPM no tituladas Oro*(Relación Precio-costo para no titulada Oro)	Propuesta por equipo de trabajo
Parámetro	Aumento Normal de UPM no tituladas Oro	UPM/año	Número base de UPM que se crean por año	150	Supuesto
Parámetro	Costos informal Oro	\$/gr	Costo de producir un gramo de oro de forma no titulada.	23.7	(Goñi Pacchioni et al., 2014)
Auxiliar	Relación Precio-costo para no titulada Oro	Adimensional	Rentabilidad de la actividad minera no titulada que varía la cantidad de UPM no tituladas creadas por año	Precio retardado oro/Costos informal Oro	Propuesta por equipo de trabajo
Nivel	UPM no titulada Oro	UPM	Cantidad de UPM no tituladas	UPM no titulada oro (t-1) + (Nuevas UPM no tituladas	Propuesta por equipo de trabajo

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN/DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
				Oro - Programas de titularización y formalización Oro)*dt	
Flujo	Programas de titularización y formalización Oro	UPM/año	Cantidad de UPM no tituladas que pasan a ser Tituladas debido a las acciones del gobierno	UPM no titulada Oro*Eficiencia del programa de titularización Oro	Propuesta por equipo de trabajo
Parámetro	Eficiencia del programa de titularización Oro	1/año	Impacto de los programas de titularización y formalización de UPM no tituladas	(0,07/4)	Supuesto. Basado en taller 1
Nivel	Capacidad de producción Oro	gr/año	Cantidad máxima de producción del mineral por año, debido a la maquinaria de las minas.	Capacidad de producción oro (t-1) + (Ampliación de capacidad Oro +Capacidad formalización oro - Depreciación Oro)*dt	Propuesta por equipo de trabajo
Flujo	Capacidad formalización Oro	gr/año ²	Aumento en la capacidad de producción titulada debido a inclusión de capacidad perteneciente a UPM no tituladas	Productividad no titulada Oro*Programas de titularización y formalización Oro	Propuesta por equipo de trabajo

5.3 Marco regulatorio y político

El marco regulatorio y político afecta todos los demás módulos del modelo. En el marco regulatorio y político se agrupan los principales parámetros regulatorios definidos por el gobierno, como se muestra en la Figura 28. . Por esto, las variables que componen este módulo son en su mayoría exógenas al modelo; estas variables exógenas son: tasa de impuestos, capacidad de fiscalización y porcentajes de regalías. Aunque el precio de liquidación de regalías se define con base en precios de mercado y costos de transporte, el precio de liquidación de regalías refleja políticas mineras y por esto se incluye dentro del marco regulatorio.

Para la liquidación de las regalías para carbón se calculan dos precios diferentes: el precio para carbón de exportación se calcula como un porcentaje del precio internacional; el precio para carbón del interior es igual al precio de carbón de exportación menos el costo de transporte del interior al puerto. El precio de liquidación de regalías para oro es el producto entre el precio internacional y el porcentaje de regalías para oro. Para la caliza se realiza un cálculo similar al del oro pero tomando el precio interno como referencia, pues este mineral, en principio, no se exporta.

Finalmente, como resultado de la interacción del marco regulatorio y los demás módulos, se calcula la renta minera estatal total como la suma de la renta minera estatal de cada mineral (que se describe en detalle en el módulo financiero). Las ecuaciones del módulo regulatorio se muestran en la Tabla 14.

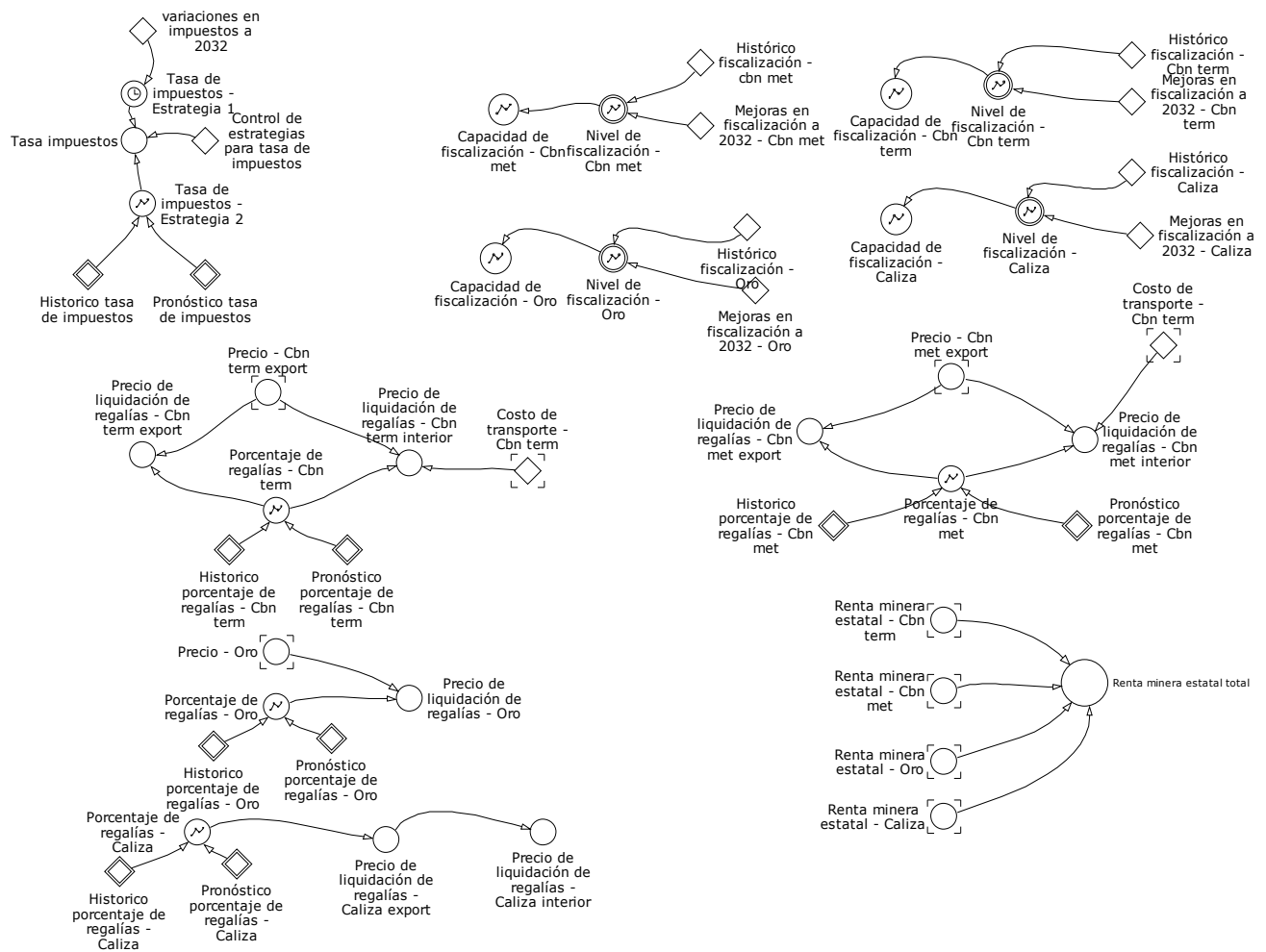


Figura 28– Diagrama de flujos y niveles para el marco regulatorio.
Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME

Tabla 14 – Variables y ecuaciones del marco regulatorio.

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN /DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
Parámetro	Tasa impuestos	%	Tasa de impuesto de renta	33%	
Parámetro	Capacidad fiscalización	%	Porcentaje de títulos mineros que son fiscalizados por el gobierno.	Carbón térmico: 100% Carbón metalúrgico, oro, caliza: 60%	Supuesto
Parámetro	Acumulación de material particulado permisible - Cbn	µg/m3	Acumulación de contaminantes permitida por la autoridad ambiental	300	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2006; Muñoz, Quiroz, & Paz, 2006)
Parámetro	Acumulación de material particulado permisible - Caliza	µg/m3	Acumulación de contaminantes permitida por la autoridad ambiental	300	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2006; Muñoz et al., 2006)
Parámetro	Acumulación permisible de mercurio	µg/m3	Acumulación de mercurio permitida por la autoridad ambiental	1	(Organización mundial de la salud, 2002)
Parámetro	Tasa de contaminación por cianuro	mgr/m3/ Mton	Cantidad de cianuro emitido al ambiente por cantidad de oro producido	Informal: 25 Formal: 47	(M. Veiga, 2010)
Parámetro	Porcentaje de regalías carbón térmico	%	Porcentaje de cobro de regalías. Varía según el mineral. Definido por la UPME	8%	Ley 756 de 2002 (Congreso de la República de Colombia, 2002)
Parámetro	Porcentaje de regalías carbón metalúrgico	%		5%	
Parámetro	Porcentaje de regalías oro	%		4%	
Parámetro	Porcentaje de regalías caliza	%		1%	

Auxiliar	Precio de liquidación de regalías carbón térmico de exportación.	USD/ton	Valor que se paga por concepto de regalías. La relación entre el precio internacional y el precio de liquidación es aproximadamente 0.7	$0.7 * Precio_{\text{Carbón térmico}} * Porcent_{\text{regalías,C term}}$	Basado en información suministrada por la UPME
Auxiliar	Precio de liquidación de regalías carbón térmico interior	USD/ton	Precio de liquidación para carbón de exportación menos el costo de transporte	$(0.7 * Precio_{\text{Carbón térmico}} - Costo_{\text{transporte}}) * Porcent_{\text{regalías,C term}}$	Basado en información suministrada por la UPME
Auxiliar	Precio de liquidación de regalías carbón metalúrgico de exportación	USD/ton	Valor que se paga por concepto de regalías. La relación entre el precio internacional y el precio de liquidación es aproximadamente 0.7	$0.7 * Precio_{\text{Carbón met}} * Porcent_{\text{regalías,C met}}$	Basado en información suministrada por la UPME
Auxiliar	Precio de liquidación de regalías carbón metalúrgico interior	USD/ton	Precio de liquidación para carbón de exportación menos el costo de transporte	$(0.7 * Precio_{\text{Carbón met}} - Costo_{\text{transporte}}) * Porcent_{\text{regalías,C met}}$	Basado en información suministrada por la UPME
Auxiliar	Precio de liquidación de regalías oro	USD/g	Precio de la bolsa de Londres multiplicado por el porcentaje de regalías	$Precio_{\text{oro}} * Porcent_{\text{regalías,oro}}$	Basado en información suministrada por la UPME
Auxiliar	Precio de liquidación de regalías caliza	USD/ton	Precio promedio interno multiplicado por el porcentaje de regalías	$Precio_{\text{Caliza}} * Porcent_{\text{regalías,caliza}}$	Basado en información suministrada por la UPME
Auxiliar	Renta minera estatal total	USD/año	Sumatoria de la renta que aporta cada mineral	$Renta_{\text{Estatad,Cter}} + Renta_{\text{Estatad,Cmet}} + Renta_{\text{Estatad,Oro}} + Renta_{\text{Estatad,Caliza}}$	

5.4 Módulo financiero

El módulo financiero tiene tres componentes: Costos, decisiones de inversión y ganancias. Para cada mineral estos componentes representan el promedio de las decisiones de la industria. Las ecuaciones de este módulo se presentan en la Tabla 15. Cada componente se modela como sigue:

5.4.1 Costos

Los costos están divididos en costos de exploración, costo de desarrollo (o costo capital) y costo de producción, como se muestra en la Figura 29. Para el costo de exploración se hace el supuesto de que el costo unitario (USD/ton) aumenta a medida que se agota el recurso, pues cada vez es más difícil encontrar mineral. Este supuesto se basa en lo observado para gas natural en el modelo de Naill (1992). De esta forma, el costo de exploración aumenta a medida que las reservas probables disminuyen. El costo de desarrollo es el valor unitario que cuesta instalar una mina con toda la infraestructura necesaria, incluida infraestructura de transporte. Se ha observado en países como Australia que este costo aumenta a medida que aumenta el desarrollo acumulado, es decir, cada vez es más costoso instalar minas, pues las más económicas se instalan primero (Shafiee, Nehring, & Topal, 2009). Finalmente, el costo unitario de producción de carbón depende del costo de extracción, y el costo de transporte.

Para este estudio se considera que el costo de operación de la producción de caliza es constante y el de oro se modela según los datos históricos disponibles. Finalmente, los costos totales se calculan como la suma de costo de exploración, costo de desarrollo y costo de operación.

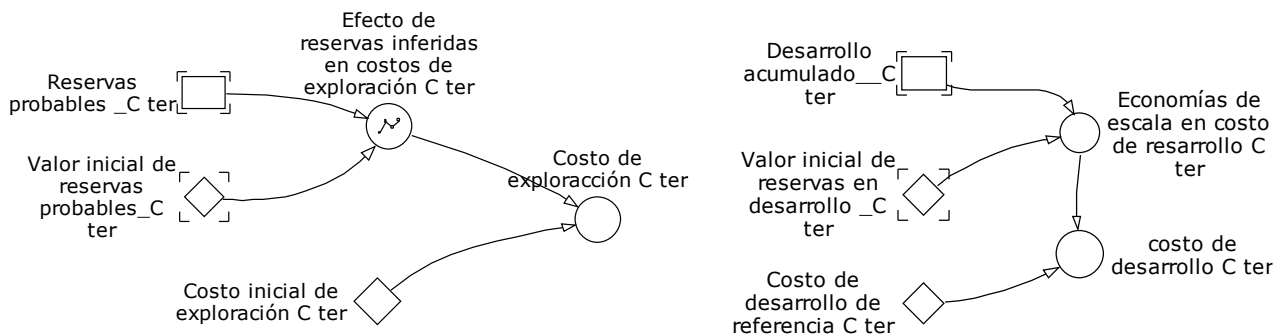
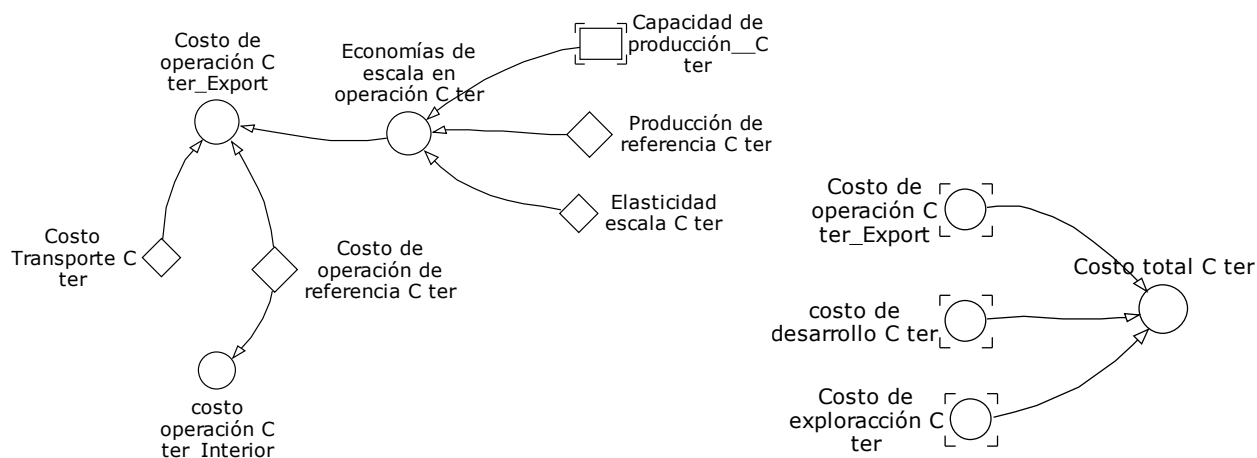


Figura 29– Diagrama de flujos y niveles de costos.

Diagrama para carbón térmico. La estructura se replica para los demás minerales.

Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME



Continúa Figura 30 – Diagrama de flujos y niveles de costos.
Diagrama para carbón térmico. La estructura se replica para los demás minerales.

Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME

5.4.2 Decisiones de inversión

En el modelo propuesto, los inversionistas toman tres decisiones diferentes (ver Figura 30). La primera, decisión de cuánto producir, es una decisión de corto plazo que depende del precio y de los costos de operación, como se mostró en el módulo de producción (ver Figura 23). La segunda decisión, de invertir en nuevo desarrollo, depende de la relación entre el precio y el costo de operación más el costo de desarrollo; si esta relación es mayor que una relación de referencia la decisión de inversión es igual a 1, de lo contrario es igual a cero. La tercera decisión es la decisión de invertir en exploración; esta depende de un atractivo de la actividad minera, medido como la relación entre el precio y los costos totales. Similar a la anterior, si este atractivo es mayor a una relación de referencia, se invierte (1), de lo contrario no (0). La relación de referencia se puede tomar como la rentabilidad promedio del sector minero para cada mineral en países en desarrollo. Los valores de referencia se pueden consultar en la base de datos Damodaran Online (Damodaran, 2014b).

Otro elemento importante es la inversión requerida para suplir las necesidades de desarrollo y exploración. La inversión necesaria en desarrollo se calcula como el costo de desarrollo multiplicado por la tasa de desarrollo más la ampliación de capacidad (para reemplazar la depreciación). La inversión necesaria en exploración se calcula como el costo de exploración por la tasa de descubrimiento (ver Figura 30).

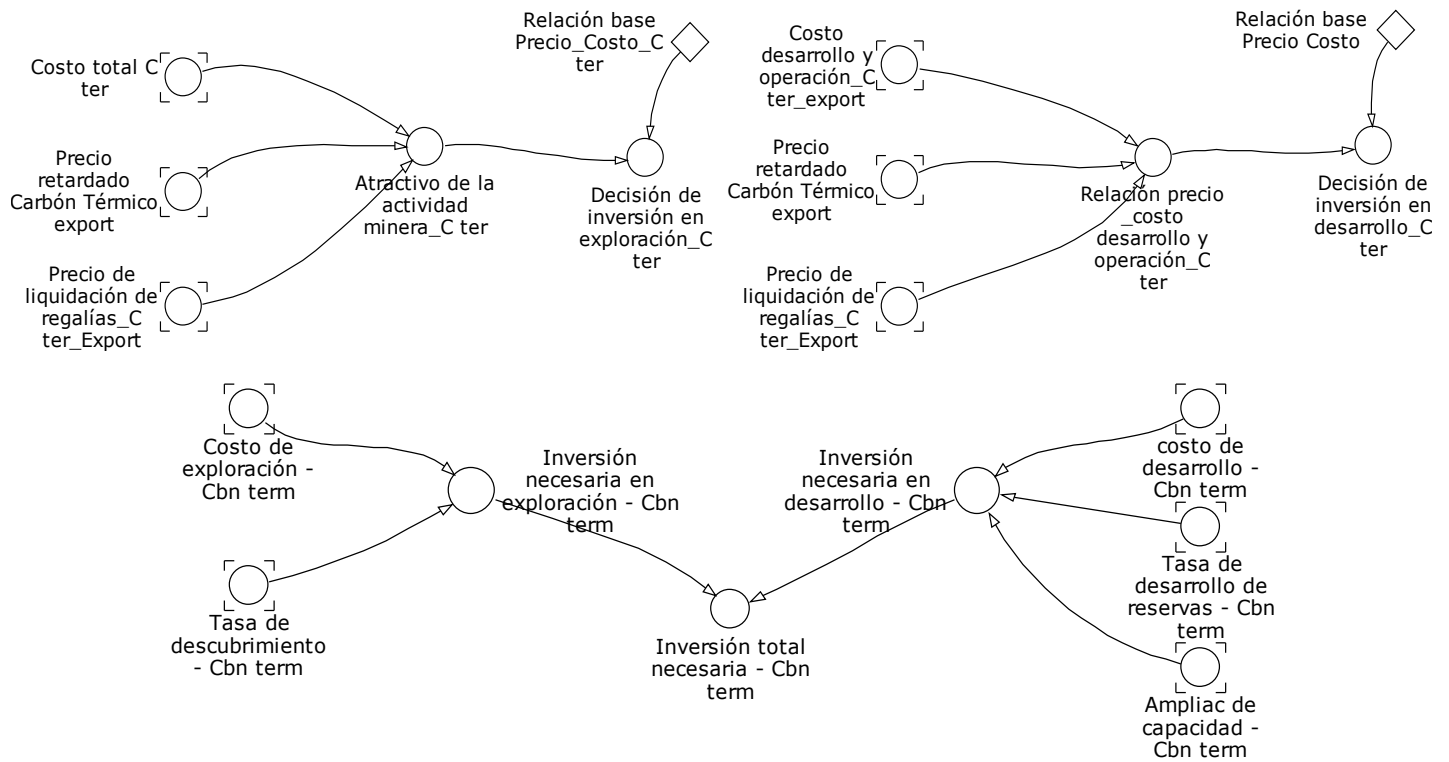


Figura 30– Diagrama de flujos y niveles de decisiones de inversión.
 Diagrama para carbón térmico. La estructura se replica para los demás minerales.
Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME

5.4.3 Ganancias

Las ganancias netas de la industria minera para cada mineral se calculan como la diferencia entre los ingresos y los egresos (ver Figura 31). Los ingresos son iguales a la producción por el precio de venta. Los egresos están separados en costos (producción por costo de desarrollo y operación), regalías efectivas e impuestos. Las regalías efectivas se calculan como las regalías nominales (producción por precio de regalías) multiplicadas por la capacidad de fiscalización. Los impuestos se calculan como las ganancias libres de regalías (ingresos – costos – regalías) multiplicadas por la tasa de impuestos y la capacidad de fiscalización. La renta minera estatal es igual a la suma de regalías e impuestos.

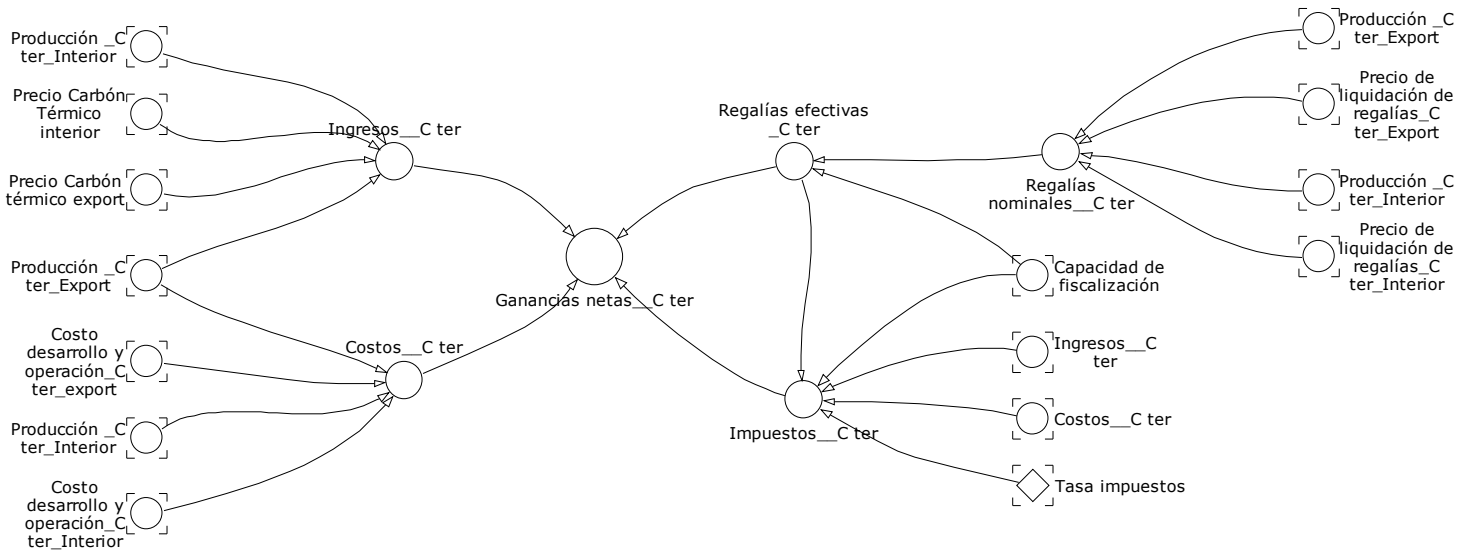
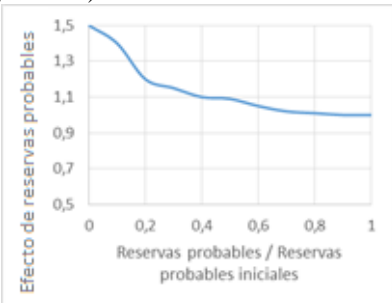


Figura 31 – Diagrama de flujos y niveles de ganancias.
 Diagrama para carbón térmico. La estructura se replica para los demás minerales.
Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME

Tabla 15 – Variables y ecuaciones del módulo financiero.
Cada ecuación se repite para cada mineral, excepto en aquellas que se hace la salvedad

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN /DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
COSTOS					
Parámetro	Costo inicial de exploración	USD/ton	Costo de exploración al inicio de la simulación	1.2 <<USD/ton>>	Calculado a partir de Resolución 428 del 16 de junio de 2013
Auxiliar	Efecto de reservas inferidas en costos de exploración	Adim	Factor multiplicador que aumenta el costo inicial a medida que se agotan las reservas probables. Se modela como función gráfica	GRAPH (Reservas probables /Valor inicial de reservas probables, 0,0.1, { 150,140,120, 115, 110,109,105,102,101,100,100//Min:50;Max:150//}<<%>>) 	Basado en (Naill, 1992)
Auxiliar	Costo de exploración	USD/ton	Costo unitario de exploración. Modificado por el efecto anterior	$costo_{explor, inicial} * Efecto_{reservas inferidas}$	Basado en (Naill, 1992)
Parámetro	Costo de desarrollo de referencia	USD/ton	Costo capital de desarrollo de mina al inicio de la simulación	3 <<USD/ton>>	Basado en (Shafiee et al., 2009)
Auxiliar	Economías de escala en costo de desarrollo	Adim	Efecto que aumenta el costo de desarrollo a medida que aumenta el desarrollo acumulado	$\left(\frac{Desarrollo_acum}{Reservas\ en\ desarrollo_{inicial}} \right)^{0.137}$	Basado en (Shafiee et al., 2009) El exponente 0.137 se calibró para minería
Auxiliar	Costo de desarrollo	USD/ton	Costo unitario de desarrollo. Modificado por efecto de economías de escala	$Costo_{desarrollo, referencia} * Economías_{escala, desarrollo}$	Basado en (Shafiee et al., 2009)

Parámetro	Producción de referencia	Ton/año	Varía según el mineral. Producción asociada al costo de referencia	Carbón térmico: 5 Mton/año Carbón metalúrgico: 2 Mton/año Oro: 500 ton/año Caliza:	calibrado
Parámetro	Factor de elasticidad de escala	Adimensional	Varía según el mineral. Parámetro que modifica el costo de operación.	Carbón térmico: -0.033 Carbón metalúrgico: -0.033 Caliza: 1 (el costo se deja constante)	Valores basados en Shafiee et al., 2009)
Auxiliar	Economías de escala en operación	Adimensional	Varía según el mineral- Efecto multiplicador que afecta el costo de operación de referencia	Carbón térmico, Carbón metalúrgico y Caliza: $\left(\frac{Capacidad_{produccion}}{Producción_{referencia}} \right)^{Elasticidad_{escala}}$ Oro: GRAPH(Capacidad de producción_Oro/Producción de referencia_Oro,0,0.2,{112,105,101,98,97,100,101,106,113,121,132,144,158,187//Min:70;Max:200//}<<%>>)	Propuesta por el equipo de trabajo
Parámetro	Costo de operación de referencia	USD/ton	Costo asociado a la producción de referencia. No incluye costo de transporte, regalías ni impuestos	Carbón térmico: 27 <<USD/ton>> Carbón metalúrgico: 60 <<USD/ton>> Oro: varía según históricos, entre 8 y 24 USD/gr Caliza: 4.5 <<USD/ton>>	Basado en encuesta minera para liquidación de regalías.
Parámetro	Costo de transporte	USD/ton	Costo unitario promedio de transportar el mineral hasta puerto. Solo aplica para carbón	Carbón térmico: 6 <<USD/ton>> Carbón metalúrgico: 27 <<USD/ton>> Caliza:	Suministrada por UPME
Auxiliar	Costo de operación exportación	USD/ton	Costo de operación de referencia modificado por economías de escala y costo de transporte (solo carbón).	$Costo_{operación, referencia} * Economías_{escala, operación} + costo_{transporte}$	Propuesta por equipo de trabajo
Auxiliar	Costo operación interior	USD/ton	No aplica para oro. Costo de operación de referencia. No se ve afectado por economías de escala	$Costo_{operación, referencia}$	Basado en información suministrada por UPME
Auxiliar	Costo total	USD/ton	Suma de todos los costos	$Costo_{explor} + Costo_{desarrollo} + Costo_{operación}$	

Auxiliar	Costo desarrollo y operación	USD/ton	Suma de costo de desarrollo y costo de operación	$Costo_{desarrollo} + Costo_{operación}$	
DECISIONES DE INVERSIÓN					
Parámetro	Relación base precio costo	Adimensional	Rentabilidad de referencia para el mineral. Basado en tasas de retorno para mercados emergentes.	Carbón: 1.54 Oro: entre 1.3 y 1.5 Caliza: 1.1	(Damodaran, 2014a)
Auxiliar	Atractivo de la actividad minera	Adimensional	Relación entre el precio y el costo total, incluido el valor que se paga por regalías	$\frac{Precio}{Costo_{total} + Precio_{regalías}}$	Propuesta por equipo de trabajo. Basado en (Naill, 1992)
Auxiliar	Decisión de inversión en exploración	Adimensional	Variable binaria que indica si se invierte o no en exploración, dependiendo de la rentabilidad de la actividad minera	$\begin{cases} \text{si } Atractivo_{mineria} \leq Relación_{base} & 0 \\ \text{si } Atractivo_{mineria} \geq Relación_{base} & 1 \end{cases}$	
Auxiliar	Relación precio _ costo de operación y desarrollo	Adimensional	Relación entre el precio de venta y el costo de operación y desarrollo, incluido regalías	$\frac{Precio}{Costo_{oper} + Costo_{desarrollo} + Precio_{regalías}}$	
Auxiliar	Decisión de inversión en desarrollo	Adimensional	Variable binaria que indica si se invierte o no en desarrollo, dependiendo de la rentabilidad de la actividad minera	$\begin{cases} \text{si } Relación_{prec, inve y op} \leq Relación_{base} & 0 \\ \text{si } Relación_{prec, inve y op} \geq Relación_{base} & 1 \end{cases}$	
Auxiliar	Inversión necesaria en exploración	USD/ton	Dinero necesario para realizar la exploración requerida según metas de reservas	$Costo_{exploración} * Tasa_{Descubrimiento}$	Propuesta por equipo de trabajo
Auxiliar	Inversión necesaria en desarrollo	USD/ton	Dinero necesario para realizar la desarrollo requerido según metas de reservas, y para suplir la depreciación	$costo_{desarrollo} * (Tasa_{Descubrimiento} + ampliación_{capacidad})$	
Auxiliar	Inversión necesaria total	USD/ton	Dinero total necesario	$Inversión_{exploración} + Inversión_{desarrollo}$	
GANANCIAS					
Auxiliar	Ingresos	USD/año	Dinero que ingresa por venta del mineral	$Producción * Precio$	
Auxiliar	Costos	USD/año	Costos totales por producción de mineral y desarrollo necesario. No incluye regalías	$Producción * (costo_{desarrollo} + Costo_{operación})$	

Auxiliar	Regalías nominales	USD/año	Regalías totales que deben pagarse al estado. El precio de regalías ya incluye el porcentaje de regalías.	$Producción * Precio_{regalías}$	Basado en información suministrada por la UPME
Auxiliar	Regalías efectivas	USD/año	Regalías reales que se pagan al estado. Menor a regalías nominales.	$Regalías_{reales} * Capacidad_{fiscalización}$	
Auxiliar	Impuestos	USD/año	Valor que se paga al estado por concepto de impuestos. En caso de generarse pérdidas no se cobran impuestos	$Capacidad_{fiscalización} * MAX((Ingresos - Costos - Regalías_{efectivas}) * Tasa_{impuestos}, 0)$	
Auxiliar	Ganancias netas	USD/año	Diferencia entre ingresos y egresos	$Ingresos - Costos - Regalías_{efectivas} - Impuestos$	
Auxiliar	Renta minera estatal	USD/año	Ingresos que recibe el estado por la actividad minera del mineral i	$Regalías_{efectivas} + Impuestos$	

5.5 Módulo ambiental

Como se mencionó en el planteamiento de la hipótesis dinámica, los efectos sociales y ambientales dependen directamente de la producción. El módulo ambiental incluye los impactos ambientales más significativos de cada mineral. Para el caso del carbón se tienen en cuenta la contaminación del aire, producto de la emisión de material particulado y la competencia por el agua – con otros sectores de la economía y las comunidades - ya que la explotación de carbón a gran escala se lleva a cabo usando tecnología a cielo abierto y en una zona del país con una gran vulnerabilidad hídrica (IDEAM, 2010) (Ver Figura 32).

Carbón térmico y caliza:

La contaminación del aire por material particulado depende directamente de la producción. Mientras más producción haya mayor será la contaminación. Las emisiones de material particulado se calculan como el producto del flujo de producción y una tasa de contaminación. El material particulado se acumula en el aire, pero también se dispersa rápidamente. El nivel de acumulación de material particulado se compara con respecto a un nivel de acumulación permisible – el cual se obtiene de los estudios de la organización mundial de la salud, y corresponde a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Angulo, Huertas, & Restrepo, 2011). Cuando el nivel de material particulado es mayor que el nivel permisible, la función de daños del carbón toma mayores valores; cuando es menor, la función disminuye, lo cual refleja la capacidad de recuperación del medio ambiente. Esta misma estructura se replica para la extracción de caliza, pero sin incluir el efecto de uso de agua.

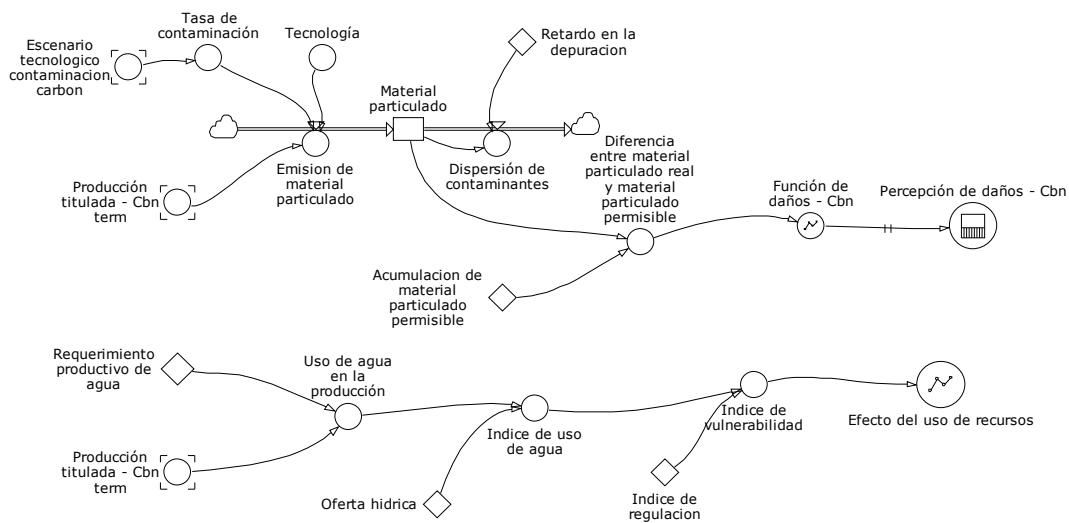


Figura 32 – Diagrama de flujos y niveles del módulo ambiental para carbón.

Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME. La misma estructura se replica para caliza, exceptuando el consumo de agua.

Oro:

El módulo ambiental del oro solo analiza los efectos contaminantes de este tipo de explotación sobre los recursos hídricos, en la forma de vertimientos de cianuro y mercurio, los cuales son los agentes más comúnmente utilizados para refinar oro (M. Veiga, 2010) (ver Figura 33). Como en el caso del carbón la contaminación está relacionada positivamente con la producción. Mientras mayor sea la producción de oro, mayores serán los vertimientos de mercurio y cianuro. Estos vertimientos se acumulan en los cuerpos hídricos y a diferencia de la contaminación del aire, estos suelen tardar años en ser depurados por el medio ambiente.

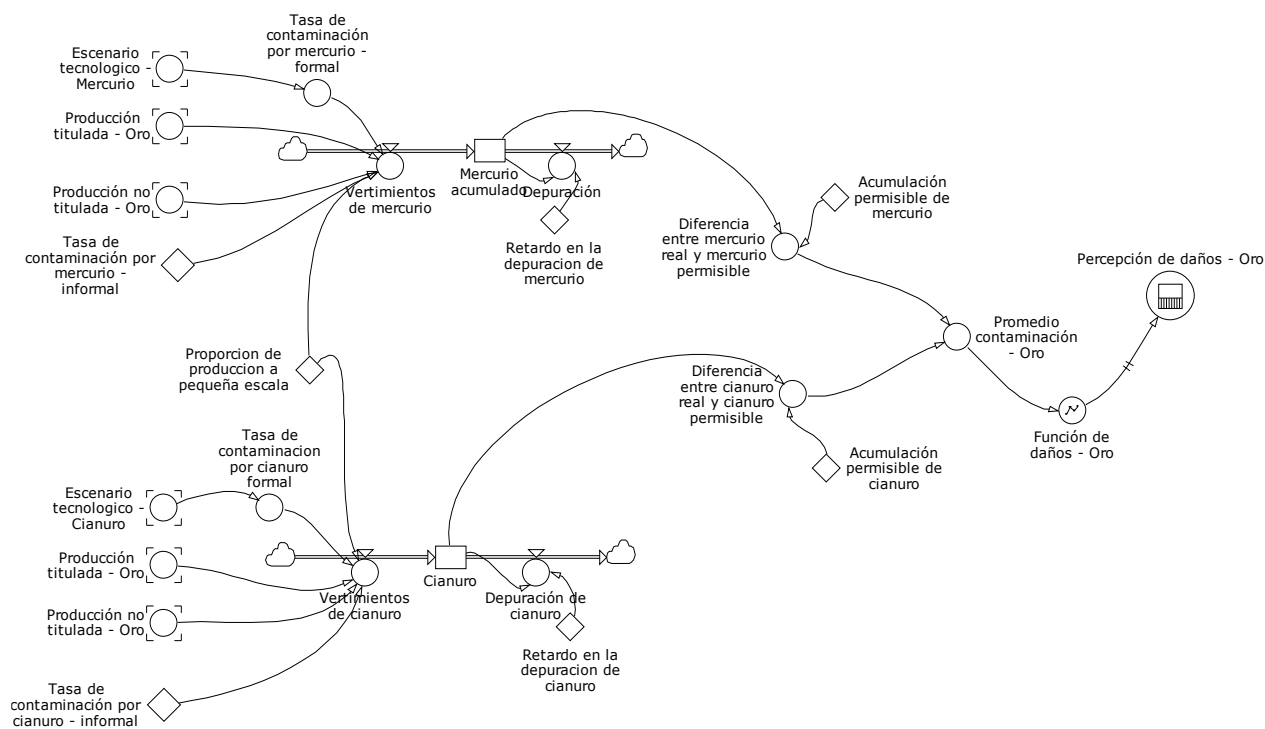


Figura 33 – Diagrama de flujos y niveles del módulo ambiental para oro.
Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME

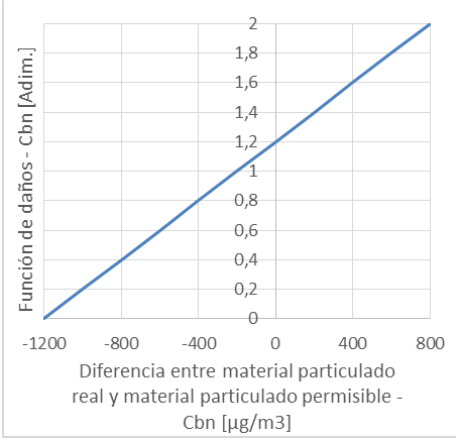
El nivel de mercurio y cianuro acumulado en el medio ambiente se compara con los niveles permisibles de contaminantes, los cuales se obtienen de los estudios de OMS y de la legislación peruana, ya que Colombia no tiene legislación acerca los límites permisibles de estos agentes (Ada Alegre Consultores, 2011; Organización mundial de la salud, 2002). Cuando los niveles de mercurio y cianuro superan los límites permisibles, la función de daños oro toma valores mayores. Sin embargo, existe un tiempo considerable entre la ocurrencia de daños ambientales y la percepción de estos. Para representar esto, se crea una variable llamada percepción de daños del oro, la cual es un retardo de información de primer orden de la variable

función de daño oro. Finalmente, los aumentos en la función de daños se reflejan en aumentos en la variable “conflicto social”.

Para el cálculo de los vertimientos se tiene que tener en cuenta que los explotadores de oro pueden ser de pequeña o gran escala. Esta diferencia se manifiesta principalmente en el tipo de reactivo utilizado para el beneficio de oro. Puesto que el proceso de refinación de oro con mercurio es mucho más sencillo, este suele ser utilizado por los mineros de pequeña escala y artesanales. Mientras que para explotaciones de mediana y gran escala la utilización de cianuro es mucho más común. Por esta razón, los vertimientos de cianuro y mercurio se calculan de manera ponderada con respecto a la producción. Es decir la producción no titulada, que corresponde al 11% aproximadamente, es la responsable de los vertimientos de mercurio, mientras que la producción restante es la responsable de los vertimientos de cianuro. Las ecuaciones del módulo ambiental se presentan en la Tabla 16.

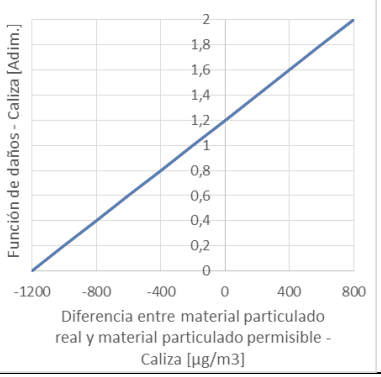
Tabla 16 – Variables y ecuaciones del módulo ambiental.

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN/DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
Carbón					
Contaminación					
Parámetro	Tasa de contaminación - Cbn	$\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{Mton}$	Cantidad de material contaminante emitido al aire por cantidad de carbón producido	70	(Angulo et al., 2011; Ghose & Majee, 2001)
Parámetro	Tecnología	Sin unidades	Efecto de la inversión tecnológica sobre la contaminación	0,2	(Wilson & Cervantes, 2014)
Flujo	Emisión de material particulado - Cbn	$\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$	Cantidad total de contaminantes vertido en un año	(Producción titulada - Cbn _{term} * Tasa de contaminación - Cbn * Tecnología)	propuesta por el equipo de trabajo
Nivel	Material particulado - Cbn	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cantidad de material particulado acumulado en el aire	+ (Emisión de material particulado - Cbn) - (Dispersión de contaminantes - Cbn)	propuesta por el equipo de trabajo
Constante	Retardo en la depuración - Cbn	días	Cantidad de tiempo requerido para depurar las sustancias contaminantes del aire	180	propuesta por el equipo de trabajo
Flujo	Dispersión de contaminantes - Cbn	$\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$	Depuración anual de contaminantes en el aire	Material particulado - Cbn / Retardo en la depuración - Cbn	propuesta por el equipo de trabajo
Parámetro	Acumulación de material particulado permisible - Cbn	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Acumulación de contaminantes permitida por la autoridad ambiental	300	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2006; Muñoz et al., 2006)
Auxiliar	Diferencia entre material particulado real y material particulado permisible - Cbn	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia entre contaminación real y contaminación permisible	(Material particulado - Cbn) - (Acumulación de material particulado permisible - Cbn)	(Wagner, 2008)
Auxiliar	Función de daños - Cbn	Adimensional	Función no lineal gráfica. Cuando la diferencia entre la contaminación real y la permisible es menor que cero, la función de daño está entre 0 y 1,2; cuando la diferencia es mayor	GRAPH('Diferencia entre material particulado real y material particulado permisible - Cbn'; -1200<<ug/m3>>;200<<ug/m3>>;{0;0,2;0,4;0,6;0,8;1;1,2;1,4;1,6;1,8;2//Min:-1;Max:11//})	(Riera, Garcia, Kristrom, & Brennlund, 2005)

			que cero, la función de daños es creciente y se mueve entre 1,2 y 2.		
Parámetro	Retardo en la percepción de daños- Cbn	Años	Tiempo que se demora en formarse la percepción de daños ambientales con base en el daño ambiental	3	
Auxiliar	Percepción de daños	Sin unidades	Efectos negativos retardados de los daños, que finalmente son percibidos por las personas. Se modela como un retardo de información de orden 2.	DELAYINF('Función de daños - Cbn';Retardo en la percepción de daños - Cbn';2;1)	(Wagner, 2008) o propuesta por el equipo de trabajo
Uso de los recursos					
Parámetro	Requerimiento productivo de agua	Mm3/Mton	Cantidad de agua requerida para explotar y refinar una cantidad de carbón	0,27	¿?
Auxiliar	Uso de agua en la producción	Mm3/año	Cantidad de agua gastada al año en la producción de minerales.	(Producción titulada - Cbnterm) * Requerimiento productivo de agua	(Miranda, O., M. Liotta, A. Olguin, 2010) o propuesta por el equipo de trabajo
Parámetro	Oferta hídrica	Mm3/año	Cantidad de agua disponible para ser usada por los sectores productivos y no productivos donde se realiza la actividad extractiva.	500	(Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales, 2010)

Auxiliar	Índice de uso de agua	Adim	Relación porcentual de la demanda de agua de la minería en relación a la oferta hídrica disponible.	(Uso de agua en la producción/Oferata hídrica)*100	(Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales, 2010)																
Parámetro	Índice de regulación	Adimensional	Este índice mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas cercanas a las minas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios.	0,5	(Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales, 2010)																
Parámetro	Índice de vulnerabilidad	Adimensional	Grado de fragilidad del sistema hídrico cercano a las minas para mantener una oferta para el abastecimiento de agua a la actividad minera, que podría generar riesgos de desabastecimiento.	Índice de uso de agua/Índice de regulación	(Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales, 2010)																
Auxiliar	Efecto uso de los recursos	Sin unidades	Función no lineal gráfica. Cuando el índice de vulnerabilidad aumenta, el efecto del uso de los recursos en el conflicto social se mueve entre 0,8 y 2.	<p>GRAPH(Índice de vulnerabilidad;0;4;{0,8;1;1,1;1,3;1,5;1,7;1,9;2//Min:0;Max:2//})</p> <table border="1"> <caption>Datos estimados del gráfico</caption> <thead> <tr> <th>Índice de vulnerabilidad [Adim.]</th> <th>Efecto del uso de recursos [Adim.]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0,8</td></tr> <tr><td>5</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>10</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>15</td><td>1,4</td></tr> <tr><td>20</td><td>1,6</td></tr> <tr><td>25</td><td>1,8</td></tr> <tr><td>30</td><td>2,0</td></tr> </tbody> </table>	Índice de vulnerabilidad [Adim.]	Efecto del uso de recursos [Adim.]	0	0,8	5	1,0	10	1,2	15	1,4	20	1,6	25	1,8	30	2,0	(Miranda, O., M. Liotta, A. Olguin, 2010)
Índice de vulnerabilidad [Adim.]	Efecto del uso de recursos [Adim.]																				
0	0,8																				
5	1,0																				
10	1,2																				
15	1,4																				
20	1,6																				
25	1,8																				
30	2,0																				
Caliza																					
Contaminación																					
Parámetro	Tasa de contaminación - Caliza	µg/m3/Mton	Cantidad de material contaminante emitido al aire por cantidad de caliza producida	70	propuesta por el equipo de trabajo																
Flujo	Emisión de material	µg/m3 /año	Cantidad total de contaminantes vertido en un año	(Producción titulada - Caliza * Tasa de contaminación – Caliza)	propuesta por el equipo de trabajo																

	particulado - Caliza				
Nivel	Material particulado - Caliza	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cantidad de material particulado acumulado en el aire	+ (Emisión de material particulado – Caliza) – (Dispersión de contaminantes- Caliza)	propuesta por el equipo de trabajo
Constante	Retardo en la depuración - Caliza	días	Cantidad de tiempo que requerido para depurar las sustancias contaminantes del aire	180	propuesta por el equipo de trabajo
Flujo	Dispersión de contaminantes - Caliza	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ /año	Depuración anual de contaminantes en el aire	Material particulado - Cbn/ Retardo en la depuración - Cbn	propuesta por el equipo de trabajo
Parámetro	Acumulación de material particulado permisible - Caliza	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Acumulación de contaminantes permitida por la autoridad ambiental	300	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2006; Muñoz et al., 2006)
Auxiliar	Diferencia entre material particulado real y material particulado permisible - Caliza	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia entre contaminación real y contaminación permisible	(Material particulado – Caliza)–(Acumulación de material particulado permisible – Caliza)	(Wagner, 2008)
Auxiliar	Función de daños - Caliza	Adimensional	Función no lineal gráfica. Cuando la diferencia entre la contaminación real y la permisible es menor que cero, la función de daño está entre 0 y 1,2; cuando la diferencia es mayor que cero, la función de daños es creciente y se mueve entre 1,2 y 2.	GRAPH('Diferencia entre material particulado real y material particulado permisible - Caliza';- 1200<<ug/m3>>;200<<ug/m3>>;{0;0,2;0,4;0,6;0,8;1; 1,2;1,4;1,6;1,8;2//Min:-1;Max:11//})	(Riera et al., 2005)

					
Parámetro	Retardo en la percepción de daños- Caliza	Años	Tiempo que se demora en formarse la percepción de daños ambientales con base en el daño ambiental	3	propuesta por el equipo de trabajo
Auxiliar	Percepción de daños - Caliza	Sin unidades	Efectos negativos retardados de los daños, que finalmente son percibidos por las personas. Se modela como un retardo de información de orden 2.	DELAYINF('Función de daños _caliza';Retardo en la percepción de daños - Caliza';2;1)	(Wagner, 2008)
Oro					
Contaminación - Mercurio					
Parámetro	Tasa de contaminación por mercurio	µg/m3/Mton	Cantidad de mercurio emitido al ambiente por cantidad de oro producido	Informal: 30 Formal: 25	(Cordy et al., 2011; M. Veiga, 2010)
Parámetro	Proporción de producción a pequeña escala	Adimensional	Porcentaje de la producción total que es producida en pequeña escala	0,11	(Goñi Pacchioni et al., 2014)
Flujo	Vertimientos de mercurio	µg/m3 /año	Cantidad total de mercurio vertido en un año	((Producción titulada – Oro)*Tasa de contaminación por mercurio formal*Proporción de producción a pequeña escala)+((Producción no titulada – Oro)*(Tasa de contaminación por mercurio informal*(1-Proporción de producción a pequeña escala))	(Cordy et al., 2011; M. Veiga, 2010)
Nivel	Mercurio acumulado	µg/m3	Cantidad de mercurio acumulado en el ambiente	+ Vertimientos de mercurio – Depuración de mercurio	(Mason et al., 2012)

Constante	Retardo en la depuración de mercurio	Años	Cantidad de tiempo que se requiere para depurar el mercurio del ambiente	2	(Clarkson, 2002)
Flujo	Depuración de mercurio	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ /año	Depuración anual del mercurio acumulado en el ambiente	Mercurio acumulado/Retardo en la depuración de mercurio	(Mason et al., 2012)
Parámetro	Acumulación permisible de mercurio	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Acumulación de mercurio permitida por la autoridad ambiental	1	(Organización mundial de la salud, 2002)
Auxiliar	Diferencia entre mercurio real y mercurio permisible	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diferencia entre el mercurio real en el ambiente y el mercurio permisible	(Mercurio acumulado-Acumulación permisible de mercurio)	(Wagner, 2008)
Contaminación - Cianuro					
Parámetro	Tasa de contaminación por cianuro	mgr/m3/Mton	Cantidad de cianuro emitido al ambiente por cantidad de oro producido	Informal: 25 Formal: 47	(M. Veiga, 2010)
Flujo	Vertimientos de cianuro	mgr/m3 /año	Cantidad total de cianuro vertido en un año	$((\text{Producción titulada} - \text{Oro}) * \text{Tasa de contaminación por cianuro formal} * (1 - \text{Proporción de producción a pequeña escala})) + ((\text{Producción no titulada} - \text{Oro}) * (\text{Tasa de contaminación por cianuro informal}) * (\text{Proporción de producción a pequeña escala}))$	propuesta por el equipo de trabajo
Nivel	Cianuro acumulado	mgr/m3	Cantidad de cianuro acumulado en el ambiente	+ Vertimientos de cianuro - Depuración de cianuro	propuesta por el equipo de trabajo
Constante	Retardo en la depuración de cianuro	Años	Cantidad de tiempo que se requiere para depurar el cianuro del ambiente	2	propuesta por el equipo de trabajo
Flujo	Depuración de cianuro	mgr/m3 /año	Depuración anual del cianuro acumulado en el ambiente	Mercurio acumulado/Retardo en la depuración de mercurio	propuesta por el equipo de trabajo
Parámetro	Acumulación permisible de cianuro	mgr/m3	Acumulación de cianuro permitida por la autoridad ambiental	1000	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2006)
Auxiliar	Diferencia entre cianuro real y cianuro permisible	mgr/m3	Diferencia entre el cianuro real en el ambiente y el cianuro permisible	Cianuro - Acumulación permisible de cianuro	(Wagner, 2008)
Contaminación promedio					

Auxiliar	Promedio contaminación - Oro	mgr/m3	Cantidad promedio de contaminantes presentes en el ambiente debido a la producción de oro.	AVERAGE(Diferencia entre cianuro real y cianuro permisible, Diferencia entre mercurio real y mercurio permisible)	propuesta por el equipo de trabajo
Auxiliar	Función de daños - Oro	Adimensional	Función no lineal gráfica. Cuando el promedio de contaminación es menor que cero, la función de daño está entre 0 y 1,2; cuando la diferencia es mayor que cero, la función de daños es creciente y se mueve entre 1,2 y 2.	<p>GRAPH('Promedio contaminación - Oro',-2500<<mgr/m3>>,400<<mgr/m3>>,{0,0.2,0.4,0.6,0.8,1,1.2,1.4,1.6,1.8,2//Min:-1;Max:11//})</p> <p>Función de daños - Oro [Adim.]</p> <p>Promedio contaminación - Oro [mgr/m3]</p>	(Clarkson, 2002; Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2001; Riera et al., 2005)
Parámetro	Retardo en la percepción de daños- Oro	Años	Tiempo que se demora en formarse la percepción de daños ambientales con base en el daño ambiental	3	propuesta por el equipo de trabajo
Auxiliar	Percepción de daños - Oro	Sin unidades	Efectos negativos retardados de los daños, que finalmente son percibidos por las personas. Se modela como un retardo de información de orden 2.	DELAYINF(Función de daños - Oro,Retardo en la percepción de daños - Oro,2,1)	(Wagner, 2008)

5.6 Módulo social

Para el módulo social, se calcula el efecto del empleo y de la inversión local para cada mineral (oro y carbón). El empleo generado por la minería se calcula como la multiplicación de la producción y la productividad. La diferencia entre el empleo generado y el empleo esperado determina el efecto del empleo sobre el conflicto social de modo que si los empleos generados están por sobre los esperados, el conflicto social tiende a reducirse. Lo contrario pasa en el caso de que el empleo esperado sea mayor que el generado.

La inversión local está compuesta de dos partes: la inversión local de la empresa, que corresponde a las acciones de responsabilidad social empresarial; y la inversión local estatal, la cual proviene de los dineros de la renta minera (impuestos y regalías). El monto de inversión local empresarial se calcula a partir de la información de inversión local que reportan las empresas en sus informes de sostenibilidad, mientras que el cálculo del monto de inversión estatal local es un porcentaje de la renta minera estatal.

El monto total de inversión local – que corresponde a la suma de la inversión empresarial y estatal – se compara con un nivel de inversión esperada. Una inversión local mayor que la esperada se ve reflejada en una mejora del índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI) – se toman los NBI de los municipios con mayor producción del mineral correspondiente en el país. Lo contrario sucede cuando la inversión local es menor que la esperada. Finalmente una mejora del NBI con respecto a su valor inicial desemboca en una reducción de conflicto social.

Para la parte social existen dos efectos no lineales que intervienen en el conflicto social: efecto de la inversión local y efecto empleo, como se muestra en la Figura 34. Para calcular el efecto del empleo, primero se halla el empleo generado, dividiendo la producción entre la productividad, así mientras mayor sea la producción mayor será el empleo generado. Nótese que esta estimación del empleo se hace por separado para los distintos tipos de mineral definidos antes. Teniendo el empleo generado, se procede a comparar este con respecto al empleo esperado. La diferencia entre el empleo esperado y el empleo real, es directamente proporcional al efecto del empleo, de forma tal que el efecto del empleo aumentara conforme aumente la diferencia. En la Tabla 17 se presenta la documentación y ecuaciones de cada variable del módulo social.

Tabla 17 – Variables y ecuaciones del módulo social.

Cada ecuación se repite para cada mineral, excepto en aquellas que se hace la salvedad

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN /DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
Auxiliar	Empleo	Personas	Cantidad de empleos directos e indirectos producidos por la minería	Carbón:((Producción titulada - Cbnterm + producción titulada - Cbnmet)/Productividad- Cbn) Oro:((Producción titulada - oro)/Productividad - oro) Caliza:((Producción titulada - caliza)/Productividad - caliza)	Propuesta por el equipo de trabajo
Parámetro	Productividad	ton/personas/año	Cantidad de material que puede producir una persona en un intervalo de tiempo determinado.	Carbón:5.000 Oro: 0,001 Caliza:5.000	(Cerrejón, 2012; DRUMMOND, 2012; PRODECO, 2011)
Parámetro	Empleo esperado	Personas	Cantidad de empleos que la comunidad espera que el proyecto minero produzca	Carbón: 35.000 Oro: 40.000 Caliza: 35.000	Propuesta por el equipo de trabajo
Auxiliar	Diferencia empleo esperado-empleo real	Personas	Diferencia entre los empleos que se espera que produzcan los proyectos mineros y los empleos reales producidos	<i>Empleo esperado - empleo</i>	Propuesta por el equipo de trabajo
Auxiliar	Efecto empleo	Adimensional	Efecto del empleo sobre el conflicto social. Es una función no lineal gráfica. Cuando el empleo generado por la producción de minerales en una región es menor al esperado el empleo aumentará el conflicto social. Por el contrario cuando el empleo generado está cerca, o sea incluso mayor al esperado por esta comunidad, el empleo hará menor el conflicto social.	Carbón:GRAPH('Diferencia empleo esperado - empleo real';-50000<<personas>>;15000<<personas>>;{0;0,2;0,4;0,6;0,8;1;1,2;1,4;1,6;1,8;2//Min:-1;Max:11//}) Oro: GRAPH('Diferencia entre empleo esperado y empleo real - Copy';-100000<<personas>>;20000<<personas>>;{0;0,2;0,4;0,6;0,8;1;1,2;1,4;1,6;1,8;2//Min:-1;Max:11//}) Caliza: GRAPH('Diferencia entre empleo esperado y empleo real_caliza';-50000<<personas>>;15000<<personas>>;{0;0,2;0,4;0,6;0,8;1;1,2;1,4;1,6;1,8;2//Min:-1;Max:11//})	Propuesta por el equipo de trabajo

Parámetro	Tasa de inversión local	Carbón:M USD/Mton Oro: USD/gr Caliza:M USD/Mton	Cantidad de dinero que la mina invierte en la región por una cantidad de material producido	Carbón: 0,2 Oro: 0,02 Caliza:0,2	(Cerrejón, 2012; DRUMMOND, 2012; PRODECO, 2011)
Auxiliar	Inversión local empresarial	Carbón:M USD/año Oro: USD/año	Gasto que hacen las compañías mineras en una localidad en un año	Carbón: $((Producción\ titulada - cbnterm + producción\ titulada - cbnmet) * Tasa\ de\ inversión\ local - cbn)$ Oro: $(Producción\ titulada - Oro * Tasa\ de\ inversión\ local - Oro)$ Caliza: $(Producción\ titulada - Caliza * Tasa\ de\ inversión\ local - Caliza)$	Propuesta por el equipo de trabajo
Auxiliar	Renta minera estatal - Cbn	USD/año	Dinero que recauda el estado por la producción de carbón	$(Renta\ minera\ estatal - Cbnterm) + (Renta\ minera\ estatal - Cbnmet)$	Propuesta por el equipo de trabajo
Parámetro	Retardo en la ejecución presupuestal	año	Tiempo que se demora el estado en invertir la renta minera estatal	2	Propuesta por el equipo de trabajo
Auxiliar	Gasto público local	USD/año	Gasto por parte del estado en las regiones. Este se modela como una función de retardo de material orden 1, con un tiempo de ejecución presupuestal dado.	Carbón: $DELAYMTR(Renta\ minera\ estatal - Cbn; Retardo\ en\ la\ ejecución\ presupuestal; 1; Renta\ minera\ estatal - Cbn)$ Oro: $DELAYMTR(Renta\ minera\ estatal - Oro; Retardo\ en\ la\ ejecución\ presupuestal; 1; Renta\ minera\ estatal - Oro)$ Caliza: $DELAYMTR(Renta\ minera\ estatal - Caliza; Retardo\ en\ la\ ejecución\ presupuestal; 1; Renta\ minera\ estatal - Caliza)$	Propuesta por el equipo de trabajo
Auxiliar	Inversión total	USD/año	Gasto total en una localidad derivado de la actividad minera	$Gasto\ público\ local + Inversión\ local\ empresarial$	Propuesta por el equipo de trabajo
Parámetro	Inversión esperada	MUSD/año	Inversión que la comunidad espera ver reflejada después de la llegada de la minería	Carbón: 2.500 Oro: 150 Caliza: 2.500	Carbón: (Tanaka et al., 2007) Oro: ¿? Caliza: ¿?

Auxiliar	Diferencia inversión esperada - inversión real	\$/año	Diferencia entre la inversión esperada y la inversión real en una localidad debido a la minería	<i>Inversión esperada - inversión real</i>	((Tanaka et al., 2007)
Auxiliar	Efecto inversión local	Adimensional	Efecto de la inversión sobre las necesidades básicas insatisfechas (NBI). Cuando la inversión real supera la inversión esperada, el efecto de la inversión hará que las NBI se reduzcan. Por el contrario, cuando la inversión real es menor a la esperada, las NBI aumentarán.	Carbón: <i>GRAPH('Diferencia entre inversión esperada e inversión real'; -2400<<Musd/yr>>; 800<<Musd/yr>>; {0,1;0,2;0,4;0,6;0,8;1;1,2;1,4;1,6;1,8;2//Min:-1;Max:11//})</i> Oro: <i>GRAPH('Diferencia entre inversión esperada e inversión real - Oro'; -1500<<Musd/yr>>; 325<<Musd/yr>>; {0;0,2;0,4;0,6;0,8;1;1,2;1,4;1,6;1,8;2//Min:-1;Max:11//})</i> Caliza: <i>GRAPH('Diferencia entre inversión esperada e inversión real_caliza'; -2400<<Musd/yr>>; 800<<Musd/yr>>; {0,1;0,2;0,4;0,6;0,8;1;1,2;1,4;1,6;1,8;2//Min:-1;Max:11//})</i>	(Tanaka et al., 2007)
Parámetro	Retardo del efecto de la inversión	Año	Tiempo que tarda la inversión local en tener efecto sobre las NBI	2	Propuesta por el equipo de trabajo
Parámetro	Necesidades básicas insatisfechas iniciales	Adimensional	NBI en los municipios mineros al inicio de la simulación	Carbón: 41,3 Oro: 48,8 Caliza: 41,3	(DANE, 2005)
Auxiliar	NBI después de inversión	Adimensional	Cambio en las NBI por el efecto de la inversión derivada de la extracción minera. Se modela como una función de retardo de material orden 1.	<i>DELAYMTR('Efecto de la inversión local'*Necesidades basicas insatisfechas iniciales; Retardo del efecto de la inversión; 1; Necesidades basicas insatisfechas iniciales)</i>	Propuesta por el equipo de trabajo
Auxiliar	Necesidades básicas insatisfechas	Adimensional	Efecto del cambio en las NBI sobre el conflicto social. Si las NBI aumentan sobre las iniciales, el conflicto será más grande. Si las NBI decrecen, el conflicto será menor.	<i>NBI después de inversión/ Necesidades básicas insatisfechas iniciales</i>	Propuesta por el equipo de trabajo
Auxiliar	Conflicto social	Adimensional	Conflicto social en las localidades donde se realiza extracción de minerales. Se calcula como el promedio ponderado de: el efecto	Carbón: <i>AVERAGE(Efecto del empleo - Cbn; Necesidades basicas insatisfechas - Cbn; Percepción de daños - Cbn; Efecto del uso de recursos)</i>	Propuesta por el equipo de trabajo

			del empleo, las necesidades básicas insatisfechas, la percepción de daños ambientales, y el uso de los recursos –solo para el carbón-.	Oro y Caliza: <i>AVERAGE(Efecto del empleo; Necesidades basicas insatisfechas; Percepción de daños)</i>	
--	--	--	--	---	--

5.7 Módulo macroeconómico

Tras calcular los efectos ambientales y sociales de cada mineral, y de calcular su respectivo conflicto social, se procede a calcular la atraktividad del país. Este cálculo está basado en el cálculo de atraktividad de (Wilson & Cervantes, 2014), el cual considera el conflicto social, y otras variables de carácter exógeno en el modelo: efecto de infraestructura y efecto de seguridad. La atraktividad país se calcula para cada mineral, como promedio ponderado de los factores ambientales y sociales (representados en la variable “conflicto social”) y los factores exógenos.

Al invertir los agentes también consideran factores financieros; por eso, el cálculo de la atraktividad país no es suficiente. Entonces se calcula una variable llamada atraktividad real, la cual es el producto de la atraktividad país y la rentabilidad del negocio para el respectivo mineral. La atraktividad real de cada mineral será la responsable del flujo de recursos financieros hacia el desarrollo de reservas y las actividades de exploración. Finalmente, el promedio de todas las atraktividades reales da como resultado la atraktividad real país, que muestra qué tan deseable es llevar a cabo minería en Colombia. Las ecuaciones de este módulo se presentan en la Tabla 18.

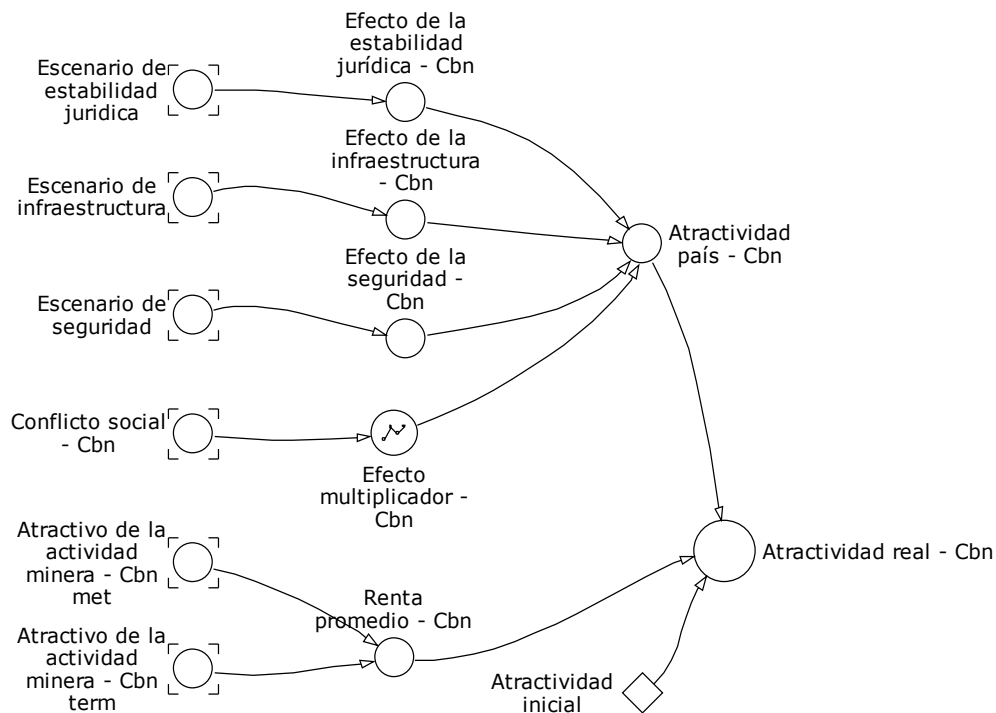



Figura 35 – Diagrama de flujos y niveles de atraktividad de carbón.

Fuente: Elaboración propia en discusiones entre grupo de trabajo UNAL-UPME. Se usa la misma estructura para oro y caliza

Tabla 18 – Variables y ecuaciones del módulo macroeconómico.
Cada ecuación se repite para cada mineral, excepto en aquellas que se hace la salvedad

TIPO DE VARIABLE	NOMBRE	UNID.	DOCUMENTACIÓN /DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN MATEMÁTICA	REFERENCIA
Auxiliar	Efecto estabilidad jurídica	Adimensional	Factor multiplicador que afecta la atractividad. Representa la estabilidad de reglas de juego del país. (Ver capítulo Escenarios de simulación)	Valor entre 0 y 1 según escenario	Propuesta por equipo de trabajo basado en (Wilson & Cervantes, 2014)
Auxiliar	Efecto infraestructura	Adimensional	Factor multiplicador que afecta la atractividad. Representa la atractividad por la infraestructura del país. (Ver capítulo Escenarios de simulación)	Valor entre 0 y 1 según escenario	
Auxiliar	Efecto seguridad	Adim	Factor multiplicador que afecta la atractividad. Representa percepción de seguridad del país. (Ver capítulo Escenarios de simulación)	Valor entre 0 y 1 según escenario	
Auxiliar	Efecto de conflicto social – mineral i	Adim	Factor multiplicador que afecta la atractividad. Esta afectado por el conflicto social descrito anteriormente. (Ver capítulo Escenarios de simulación)	$GRAPH(\text{Conflicto social}, 0, 0.2, \{2, 1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1, 0.8, 0.6\} / \text{Min}:0; \text{Max}:2 //)$ 	
Auxiliar	Atractividad país – mineral i	Adim	Producto de efectos exógenos.	$50 * \text{Efecto de conflicto social} * \text{Efecto Infraestructura} * \text{Efecto seguridad} * \text{efecto Estabilidad Jurídica}$	Propuesta por equipo de trabajo
Auxiliar	Atractividad real – mineral i	Adim	Producto de atractividad país con efecto endógeno al sector minero.	$\text{Atractividad País} * \text{Renta promedio} / \text{Atractividad inicial}$	Propuesta por equipo de trabajo
Auxiliar	Atractividad inicial	Adim	Valor de atractividad del país al inicio de la simulación. Entre 0 y 100	53	(Wilson & Cervantes, 2014)
Auxiliar	Atractividad total	Adim	Promedio de atractividad de cada mineral.	Promedio (atractividad oro, atractividad carbón, atractividad caliza)	Propuesta por equipo de trabajo

6. Validación del modelo

La Dinámica de Sistemas se caracteriza por expresar las relaciones causales entre los elementos de un sistema a través de postulados matemáticos, por lo tanto sirven para la previsión del futuro y para la explicación de fenómenos. Como cada ecuación representa la relación entre dos elementos del sistema, cada ecuación debe ser validada y la inconsistencia de una sola podría comprometer la validez del modelo (Barlas & Carpenter, 1990).

Según Barlas, la tarea de la validación debe ser apreciada desde la idea de “utilidad frente a un propósito”. Esto conlleva a la pregunta ¿Qué tan útil es el propósito del modelo? Así, en realidad, cuando se juzga la validez de un modelo se juzga la validez de su propósito, lo cual es en esencia un proceso informal, no técnico y cualitativo. A pesar de este carácter informal de la validación, existe una serie de pruebas (tanto cualitativas como cuantitativas) que aplicadas en un orden lógico, sirven como herramienta formal de validación de un modelo; Barlas (1996) las resume como se muestra en la Figura 36.

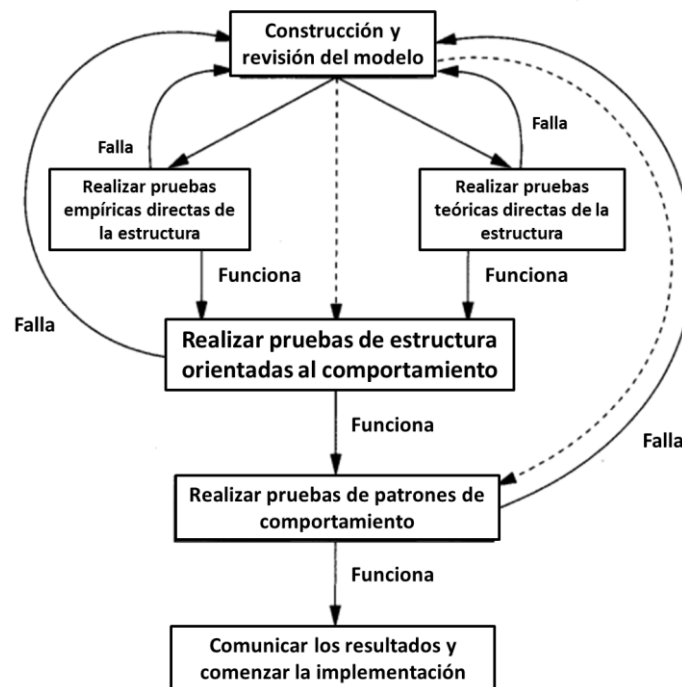


Figura 36 – Proceso de validación propuesto por Barlas (1996)

Dos partes fundamentales dentro del proceso de validación son: validación de estructura y validación del comportamiento. La primera parte consiste en evaluar cómo está siendo generado el comportamiento (*output*) que revela el modelo y la segunda evalúa el comportamiento en sí mismo; es decir, se evalúa que el resultado sea el correcto, debido a las razones correctas.

La segunda parte consiste en evaluar el ajuste entre el comportamiento que exhibe el modelo, con el comportamiento que exhibe la problemática real. En la siguiente sección se ahonda en las distintas fases del proceso de validación para el modelo de la industria minera colombiana.

6.1 Validación de la estructura

La validación de estructura se divide, a su vez, en dos: las pruebas directas de estructura y las pruebas de comportamiento orientadas a la estructura. La diferencia radica en que las pruebas directas son de carácter puramente teórico, mientras que las orientadas a la estructura utilizan la misma simulación como herramienta para estudiar la validez de los resultados.

La evaluación directa de la estructura compara el modelo con el conocimiento que se tiene del sistema real. Para ello, inicialmente, las variables identificadas se clasifican como endógenas, exógenas y excluidas. A continuación, se realiza la validación de la hipótesis dinámica (diagramas causales) por medio de pruebas empíricas a la estructura con apoyo del Taller 2 “Estructura del Modelo”, realizado durante dos días (Tabla 19) y contó con la participación de un experto metodológico internacional y diferentes funcionarios de la subdirección de minería de la UPME, Agencia Nacional Minera y Ministerio de Minas y Energía y en él se analizó el realismo del modelo. En el primer día se realizaron tres bloques de discusión; en cada bloque, el equipo de trabajo presentó una sección del modelo y los asistentes discutieron sobre los cambios o aportes necesarios a la estructura del mismo, llegando a un consenso de estructura. En el segundo día se presentó una conferencia de modelamiento en la planeación minero energética, presentada por el experto internacional. Los detalles y acta de este taller se presentan en el Anexo 3.

Tabla 19 – Metodología de taller 2: Validación de la estructura del modelo

	Bloque de discusión	Metodología	Objetivo
Día 1:	Estructura general del modelo	Presentación. Discusión.	Presentar, discutir y validar la estructura del modelo del sector minero en Colombia

	Estructura del módulo de producción	Presentación. Discusión.	
	Estructura del módulo social y ambiental	Presentación. Discusión.	
Día 2	Modelamiento en la planeación minero energética	Conferencia a cargo de Erik Larsen	Presentar los modelos dinámicos como herramienta para la toma de decisiones en la planeación minero energética. Presentar ejemplos de modelos dinámicos en otros países.

Cada variable y relación, se compara luego con información obtenida directamente del sistema. Por ejemplo, utilizar datos de costos y capacidad de producción, reportados por las empresas, para evaluar la existencia de economías de escala; o consultar a administradores de empresas mineras sobre los factores que afectan sus decisiones de inversión, y analizar, así, la validez del modelo de atractividad propuesto en este trabajo (capacidad de atracción de capital extranjero) (Wilson & Cervantes, 2014).

En el capítulo 5, Modelo del sector minero Colombia, se presentan todas las expresiones matemáticas del modelo, y la fuente de cada una de las ecuaciones y parámetros –ya sea referenciados en la literatura técnica o propuestos por el equipo de trabajo.

En la validación de comportamiento orientada a la estructura, se evalúan falencias en la estructura a partir de los resultados de simulación generados por el modelo. Para ello se realizan pruebas de estrés o de condiciones extremas con el fin de comparar los resultados esperados con los resultados de simulación. Además, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar cuáles parámetros tiene un mayor efecto sobre el sistema, conocidos como puntos de apalancamiento del sistema.

6.2 Validación de comportamiento y calibración

Tras haber realizado la validación de la estructura, se generó suficiente confianza en el modelo, y se afinaron los resultados generados por el modelo: la validación de comportamiento está más enfocado a la predicción de patrones (periodos, frecuencias, tendencias, retardos de fase, amplitudes) que a la predicción de eventos puntuales (Barlas, 1996), lo que es coherente con el marco de planeación de largo plazo de la Dinámica de Sistemas.

Para el caso del modelo del sector minero Colombia se intenta reproducir el comportamiento histórico de la producción de cada uno de los minerales considerados (oro, carbón térmico y metalúrgico y caliza). Se

realizó, entonces, una calibración mediante una herramienta de optimización propia del software que utilizamos, Powersim, con la cual, se define una serie de parámetros resultado (o dependientes) y una serie de parámetros de entrada (o independientes) y se hayan los valores de estos últimos que minimicen la diferencia entre los resultados de simulación y los datos históricos del sistema. En nuestro caso, la variable resultado es la producción de cada uno de los minerales considerados y los parámetros de entrada la relación precio-costo de referencia y producción normal para ajustar la forma de la curva de efecto de la relación precio costo sobre la producción (Figura 37)

Nótese que, tras el ajuste, las variables simuladas muestran la dinámica de largo plazo de las variables reales y que existen diferencias entre las series históricas y las simuladas. Estas diferencias son esperadas porque el modelo de simulación es una abstracción del sistema la cual captura los principales componentes de la estructura de la industria minera colombiana. En el caso del oro y del carbón metalúrgico, existen inconsistencias metodológicas en la estimación de la producción de manera que los picos y valles de la serie no necesariamente corresponden a dinámicas de producción como las representadas en el modelo.

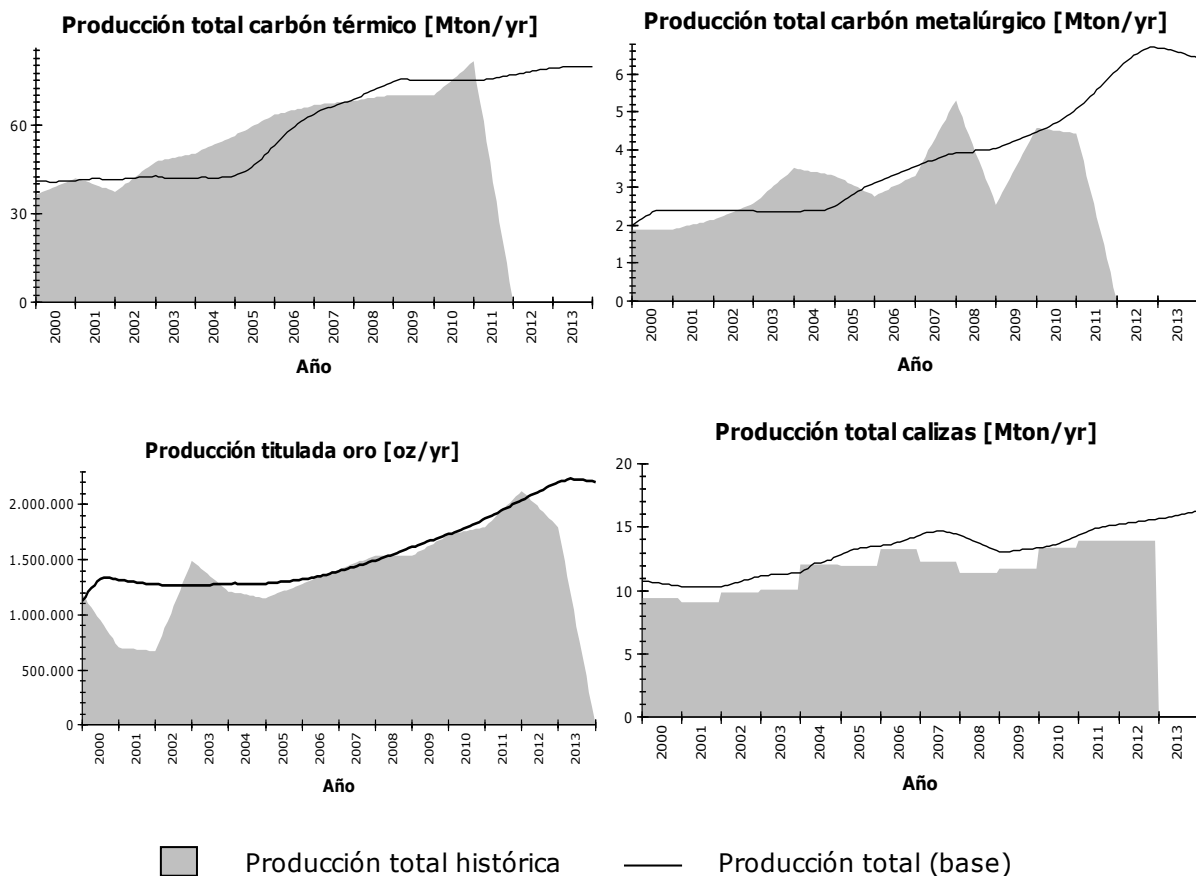


Figura 37 – Ajuste obtenido en la calibración del modelo.

El siguiente paso tras la calibración es realizar un análisis de sensibilidad cuyo objetivo es determinar cuál es la respuesta del modelo ante los cambios en los parámetros inciertos. Este análisis y su resultado se presentan en la siguiente sección.

6.3 Análisis de sensibilidad

La Tabla 20 resume el análisis de sensibilidad. En el análisis de sensibilidad se asigna una distribución de probabilidad a las variables de entrada sobre las cuales hay incertidumbre. Con base en esta distribución de probabilidad se realizan simulaciones y se observa cómo varían las variables de respuesta cuando hay variaciones aleatorias en las variables de entrada. En la tabla se observan las variables de entrada para el análisis, junto con las distribuciones de probabilidad asignadas a cada una de ellas. Las variables de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** representan incertidumbre en precios, demanda y reservas. Como se puede observar en la tabla, a todas las variables inciertas se les asigna una distribución normal con desviaciones estándar equivalentes al 10% de la media, excepto para las distribuciones de valor inicial de reservas, las cuales tienen desviaciones estándar equivalentes al 50% de la media reflejando el alto desconocimiento actual de los niveles de reservas. Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan en las siguientes secciones.

Tabla 20 – Parámetros del análisis de sensibilidad.

Variable de entrada	Distribución de probabilidad ajustada	Variable de salida
Precio base - Caliza interno	Normal(μ , 0.1 μ)	Producción de caliza de interior
Precio base – Carbón metalúrgico de exportación	Normal(μ , 0.1 μ)	Producción de carbón metalúrgico de exportación
Precio base – Carbón metalúrgico interno	Normal(μ , 0.1 μ)	Producción de carbón metalúrgico de interior
Precio base – Carbón térmico de exportación	Normal(μ , 0.1 μ)	Producción de carbón térmico de exportación
Precio base – Carbón térmico interno	Normal(μ , 0.1 μ)	Producción de carbón térmico de interior
Precio base - Oro	Normal(μ , 0.1 μ)	Producción de oro de exterior
Pronóstico demanda interna - Caliza	Normal(μ , 0.1 μ)	Producción de caliza de interior
		Producción de caliza de exportación
Pronóstico demanda interna – Carbón metalúrgico	Normal(μ , 0.1 μ)	Producción de carbón metalúrgico de interior

		Producción de carbón metalúrgico de exportación
Pronóstico demanda interna – Carbón metalúrgico	Normal(μ , 0.1μ)	Producción de carbón térmico de interior
		Producción de carbón térmico de exportación
Pronóstico demanda interna - oro	Normal(μ , 0.1μ)	Producción de oro de exterior
Valor inicial de los reservas probables - Oro	Normal(μ , 0.5μ)	Producción de oro de exterior
		Producción de oro de interior
Valor inicial de reservas en desarrollo - Caliza	Normal(μ , 0.5μ)	Producción de caliza de interior
		Producción de caliza de exportación

6.3.1 Variación en los precios

Como se puede observar en la Figura 38, los cambios en el precio internacional de los minerales afectan principalmente la producción de los minerales de exportación. Este resultado de la simulación concuerda con las suposiciones del modelo y con el comportamiento de las industrias extractivas globales en las cuales la producción minera fluctúa con los precios y es menor cuando éstos bajan. A pesar de tener efecto sobre la producción, las variaciones del 10% no son suficientes para afectar la tendencia del escenario base.

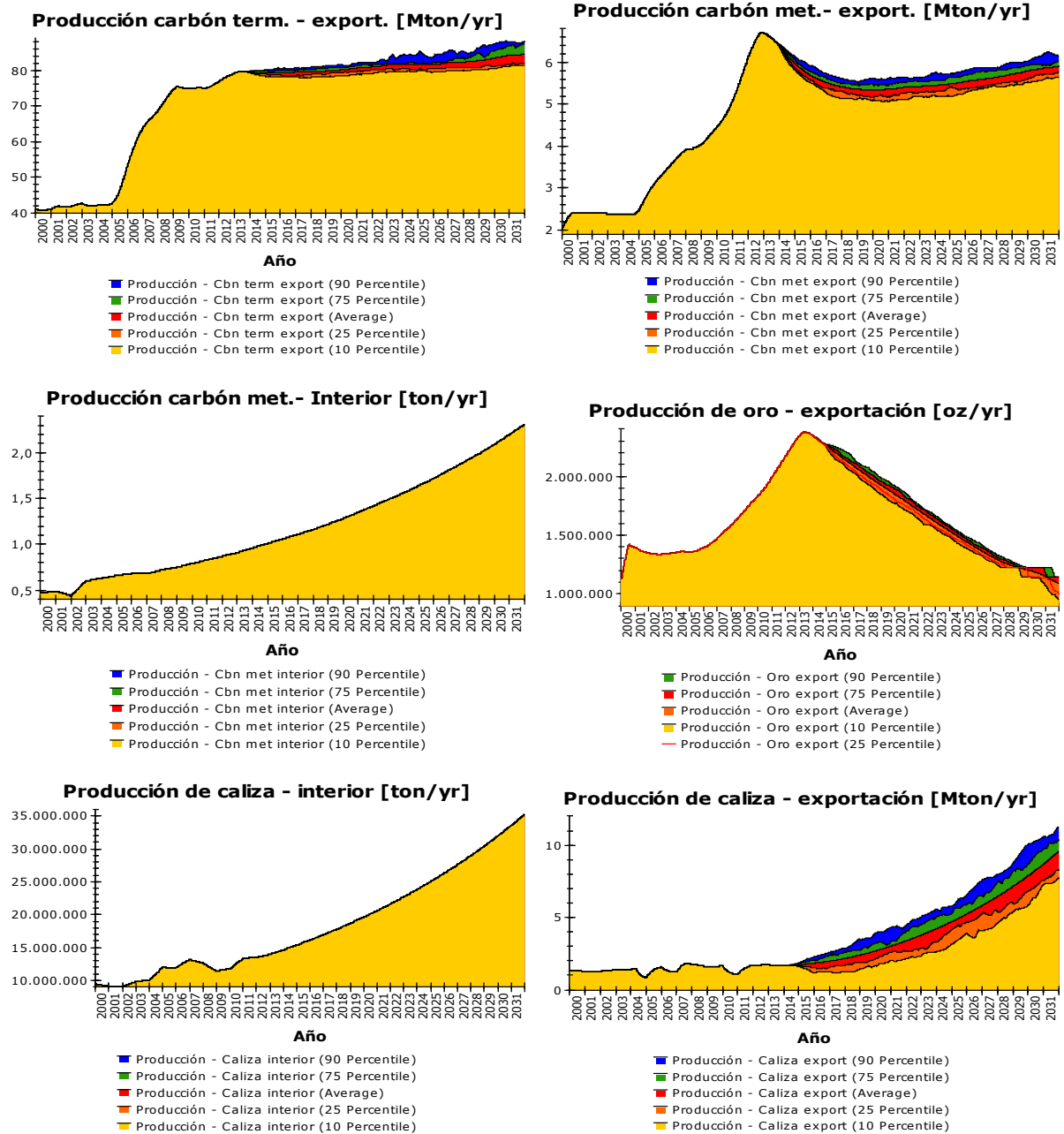


Figura 38 - Análisis de sensibilidad de la producción con respecto al precio.

6.3.2 Variación en los valores iniciales de reservas

En este apartado se muestran los resultados del análisis de sensibilidad llevado a cabo sobre los parámetros de valor inicial de reservas. El análisis solo se realiza sobre los valores iniciales de reservas probables de oro y reservas en desarrollo de caliza. Esto se debe a que la incertidumbre acerca el valor verdadero de estos parámetros es demasiado alta, debido a que no existe información oficial actual acerca de estos. Entonces,

para generar confianza, se somete la producción de estos dos minerales a variaciones en dichos parámetros, de hasta un 50%. Estos cambios en las reservas, como se observa en la Figura 39; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, no tienen impacto sobre la producción de oro y caliza. Como se discutió antes la rentabilidad, reflejada en la relación precio costo, es la que impulsa la dinámica de la producción. En el caso del oro, desde que las reservas probadas y en desarrollo iniciales sean suficientes como para sostener la dinámica del caso de referencia no se espera que las variaciones en las reservas causen grandes variaciones en la producción. En el caso de la caliza, se tienen menores tiempos de desarrollo de reservas de forma que la producción no se afecta cuando el nivel de reservas inicial es bajo.

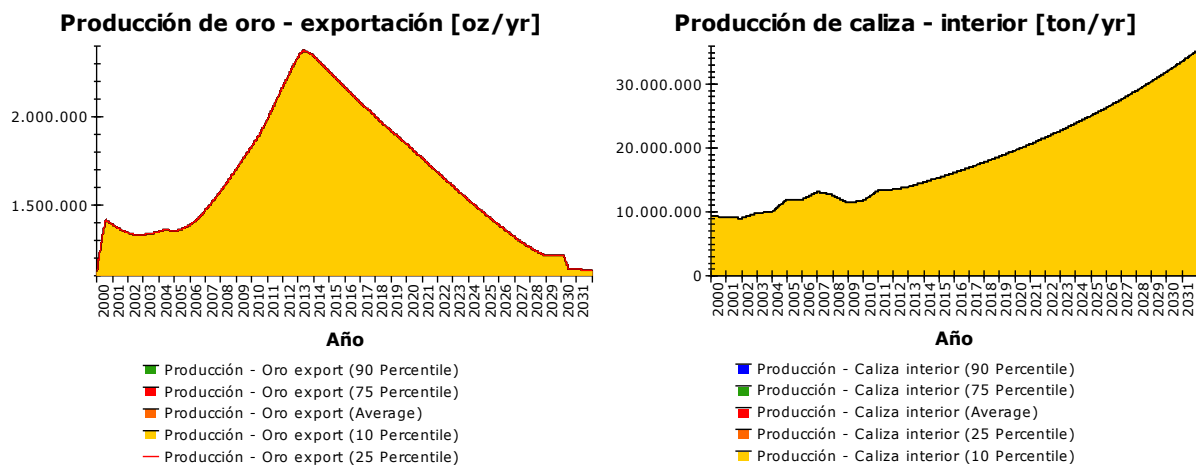


Figura 39 - Análisis de sensibilidad producción con respecto a valor inicial de reservas.

6.3.3 Variación en la demanda interna

Tras realizar el análisis de sensibilidad de los precios y cerciorarnos de que estos no afectan la producción interna, procedemos a variar los pronósticos de demanda interna ajustándole una distribución de probabilidad normal. La producción de minerales para satisfacer la demanda interna se ve afectada por esta variación. Sin embargo, la producción de algunos minerales de exportación no se ve afectada en absoluto – esto ocurre para el carbón térmico y metalúrgico, y para el oro- posiblemente debido a que la demanda de minerales interna es muy pequeña en comparación con los volúmenes de exportación, por lo cual una variación del 10% no es significativa.

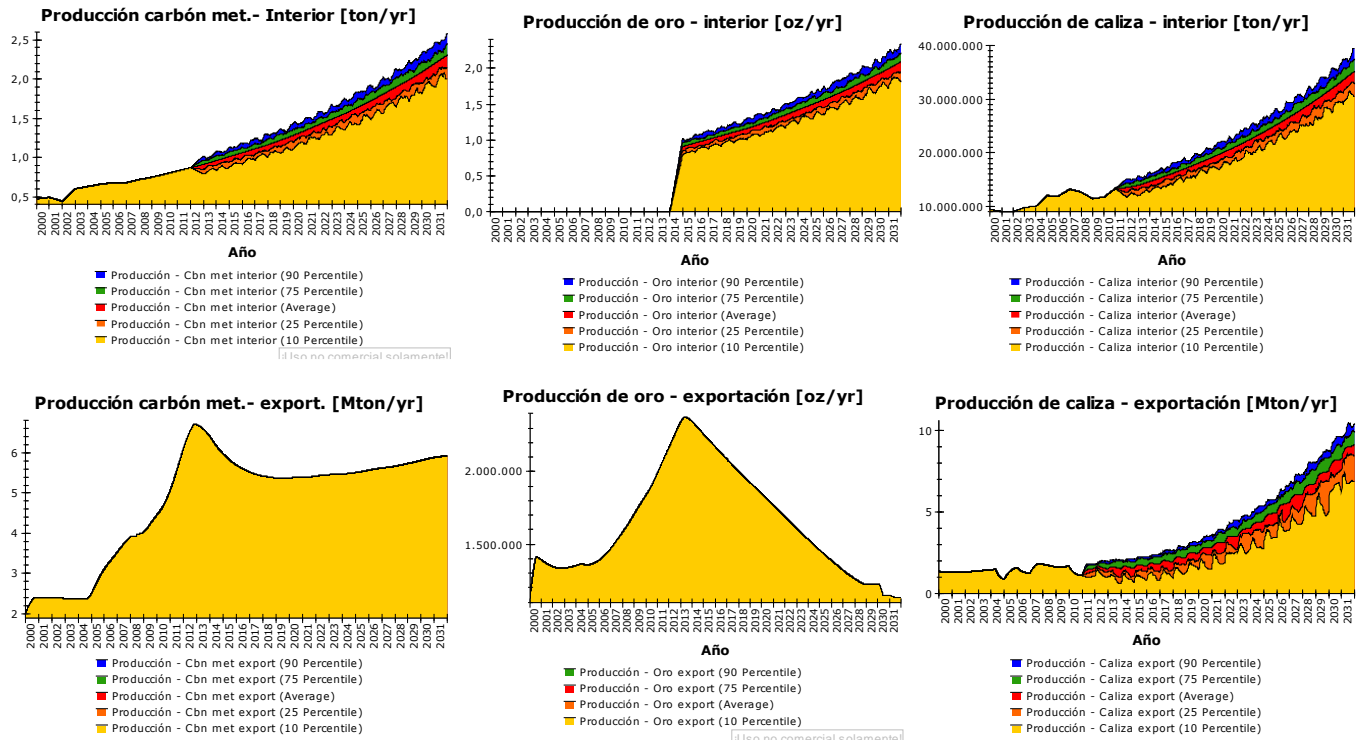


Figura 40 - Análisis de sensibilidad de producción con respecto a la demanda interna.

7. Escenarios de simulación

Para la presentación de resultados y uso del modelo, es necesario plantear un diseño completo de experimentos de simulación. Para esto se deben considerar no sólo escenarios de posibles futuros, sino también las estrategias o políticas a evaluar en cada escenario. En este capítulo se plantean y simulan tres escenarios de simulación del modelo, basados en los presentados en el documento Escenarios Mineros para Colombia. Estas simulaciones permiten comparar los resultados del modelo con lo que espera la UPME para el sector minero en el futuro, que se presentó en el capítulo 4.

7.1 Formulación de los escenarios

Los escenarios propuestos para el presente ejercicio de análisis se basan en aquellos que aparecen descritos en el proyecto Escenarios Mineros para Colombia (UPME-UNAL, 2013). Estos escenarios están basados en condiciones exógenas con mayor incertidumbre que afectan el sector minero en Colombia. Estas condiciones exógenas no pueden controlarse por parte de la UPME, algunas de ellas son el mercado internacional (precio), desarrollo tecnológico, cese del conflicto bélico interno y estabilidad política y legislativa. Aunque el modelo de simulación no busca replicar dichos escenarios a la precisión, sí puede plantearse posibles caminos para las condiciones exógenas. Cada una de dichas condiciones está representada dentro del modelo por variables o parámetros que afectan indirecta o directamente las ganancias del sector, la atractividad del país, entre otras variables de interés.

Inspirado en los conceptos encontrados en el proyecto de Escenarios Mineros para Colombia 2032, se consideran tres diferentes posibles trayectorias para cada variable exógena, como se muestra en la Tabla 21. En esta tabla se plantea una trayectoria o escenario base con las condiciones actuales de cada variable, y tres posibles trayectorias: alto, medio y bajo. La selección de los tres escenarios para cada variable se describe a continuación.

7.1.1 Precio

Los escenarios de precios medio y alto para carbón se basan en los escenarios que presenta la EIA en el Annual Energy Outlook 2014 (EIA, 2014), y presentan un comportamiento similar a los que se plantean en

el Plan de Expansión de Referencia – Generación y Transmisión 2013-2027 presentado por la UPME (UPME, 2013). Las proyecciones de precios de la UPME están basadas en las proyecciones de la EIA, por lo que se toman éstos como referencia. Para el escenario bajo se supuso una tasa constante de reducción del precio de 4% anual, hasta alcanzar el valor más bajo que se ha reportado en los últimos 10 años.

El escenario medio para el oro se tomó como la proyección reportada por CRU para la UPME. El escenario alto plantea un crecimiento constante del precio del 1% anual hasta alcanzar el valor máximo registrado en los últimos 10 años. El escenario bajo plantea un decrecimiento exponencial hasta alcanzar el valor mínimo registrado en los últimos 10 años.

7.1.2 Desarrollo tecnológico

El desarrollo tecnológico tiene efectos sobre distintos rubros de la economía minera: tasas de contaminación, costos de producción y productividad. También se debe tener en cuenta que los desarrollos tecnológicos se analizan dependiendo del mineral: oro, caliza o carbón.

En el caso de la minería de oro se cuenta con dos corrientes tecnológicas marcadas para refinar este metal precioso: el uso de mercurio que predomina entre los mineros de pequeña escala, artesanales e informales; y el uso de cianuro, el cual es predominante en las operaciones mineras de mayor escala. En el caso del mercurio existen diversas alternativas para la reducción y/o eliminación de su uso, como las retortas y los procesos de concentración gravimétrica, los cuales pueden llegar a obtener relaciones de 1 gramo de mercurio por gramo de oro producido (Rodrigues-filho, Hinton, Veiga, Beinhoff, & Huibobro, 2005; M. Veiga, 2010; Vieira, 2006).

Además, el gobierno colombiano se ha comprometido a erradicar el uso de mercurio en aras de controlar los altos índices de contaminación registrados en algunas regiones del país (UPME, 2006). Para esto ha formulado la ley No 1658 del 15 de julio del 2013, en la cual se establecen las disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, y se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación. En esta ley el gobierno establece un periodo de 10 años para erradicar el mercurio de distintos procesos industriales, y pone una meta de cinco años para erradicarlo en particular de la minería. Para ello dispone de una serie de créditos blandos para la transición tecnológica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2013)

Por el otro lado está el cianuro, que si bien tiene unos efectos menores en comparación con el mercurio – debido a que existen formas de control como la oxidación o la biodegradación (Logsdon et al., 2001) – este es un agente contaminante que con efectos perjudiciales si no se maneja adecuadamente. La sustitución del cianuro para refinar el oro – por reactivos como la tiourea o algunos halógenos (J Li & Miller, 2002; Jinshan Li & Miller, 2006) – es poco probable, sin embargo existen métodos como la bio-lixivación que prometen reducir la cantidad de reactivo utilizada. También se debe esperar un aumento en la contaminación por cianuro si se considera la transición tecnológica de los mineros de pequeña escala y artesanales, que dejen de utilizar mercurio para refinar el oro.

El desarrollo de la tecnología también tiene un efecto positivo sobre la productividad. Es decir estas nuevas tecnologías permiten aumentar la cantidad de oro recuperada en un intervalo de tiempo. Para el caso de los pequeños mineros que logren realizar una transición tecnológica desde el uso de mercurio, hacia la introducción de procesos de concentración gravimétrica y la introducción de procesos de lixiviación con cianuro, las mejoras de productividad pueden ser gigantes; M. M. Veiga et al. (2009) reporta mejoras en la productividad de al menos 60% cuando se introducen estas mejoras tecnológicas. Para el caso de las empresas mineras de gran escala se espera que las mejoras de la productividad sean menores.

En el caso del carbón y la caliza sólo se tiene en cuenta sus efectos sobre la contaminación del aire en forma de emisión de material particulado. No existen muchos desarrollos tecnológicos para controlar este tipo de contaminación, por eso no se espera una mejora significativa en el escenario de mejora tecnológica para este mineral. Para el caso del escenario de la productividad Wood Mackenzie (2014) ha realizado proyecciones donde la productividad tiende a mantenerse constante, a pesar de su caída a lo largo de los últimos cinco años.

7.1.3 Infraestructura

El Índice Global de Competitividad de Colombia 2014 – 2015 del Foro Económico Mundial muestra que el país se mantiene en lugares intermedios (Colombia ocupó el puesto 66 entre 144 países (World Economic Forum, 2014), en Suramérica por debajo de Chile (33), Brasil (57) y Perú (65), y por encima de Uruguay (80), Ecuador (No es evaluado esta vez), Argentina (104), Bolivia (105), Guyana (117), Surinam (110), Paraguay (120) y Venezuela (131)), a pesar de los grandes esfuerzos que viene haciendo por mejorar su competitividad en la región y en el mundo, debido, entre otras cosas, a la calidad global de la infraestructura del país (puesto 108 de 144 países) (World Economic Forum, 2014). La infraestructura inadecuada ocupa el segundo lugar entre los aspectos más problemáticos para hacer negocios en Colombia. Dentro de la

calidad global de la infraestructura aparecen con las más bajas calificaciones la calidad de las vías (lugar 126 de 144 países), la calidad de las vías férreas (102 de 144 países), y la calidad de la infraestructura portuaria (90 de 144 países). El lugar 126 de 144 países significa que el 87% de los países analizados tienen una mejor infraestructura vial que Colombia. Esta situación de la infraestructura es más crítica a medida que pasamos de vías primarias a vías secundarias y terciarias. El margen de mejora en la red vial del país es muy grande.

Consistente, hay una situación similar que reporta la Encuesta Anual de Empresas Mineras 2012 – 2013 del Instituto Fraser, en donde se muestra que el 46% de las empresas consideran que el estado de la infraestructura del país impide levemente la inversión en el país en minería, el 12% considera que disuade levemente esta inversión, y el 3% no continuaría o no haría inversión en minería en Colombia debido al estado de la infraestructura.

La red vial primaria del país representa la red vial troncal del país que une las diferentes regiones, y está a cargo de la Nación, bien sea por medio de concesiones (5.580 kilómetros por la Agencia Nacional de Infraestructura y 305 kilómetros por los Departamentos) o en cabeza del Instituto Nacional de Vías (11.320 kilómetros)(Ministerio de Transporte, 2013b). La red vial primaria (17.205 kilómetros) representa el 8.5% de la red vial del país. La red vial secundaria (a cargo de los Departamentos) y la red vial terciaria (a cargo de los municipios o del INVIAS – Caminos Vecinales) representan el 91.5% de la red vial del país (aproximadamente 185.000 kilómetros), y está conformada por las redes que articulan las cabeceras municipales o regiones departamentales con la red primaria, las que comunican a los municipios entre sí, y las que integran las veredas y/o los corregimientos entre ellos o con sus cabeceras municipales. El 73% se encuentra a cargo de las entidades territoriales y el 18.7% está a cargo de la nación, a través de la Subdirección de la Red Terciaria y Férrea del INVIAS, y el 8.3 % es del sector privado (INVIAS, 2014).

El Gobierno Nacional, por intermedio de la Agencia Nacional de Infraestructura – ANI - tiene unos planes ambiciosos para mejorar en el corto y mediano plazo la infraestructura del país, con el objetivo de que seamos un país mucho más competitivo en el mediano plazo. Según la ANI estas metas incluyen: Para el año 2014, incremento en el 100% en dobles calzadas construidas, incremento en un 50% en longitud férrea en operación, 50% de incremento en la capacidad de carga de los puertos del país, y un 35% de incremento en los pasajeros movilizados por los aeropuertos. Para el año 2018, cuadruplicar las dobles calzadas construidas, triplicar la longitud férrea en operación, 100% de incremento en la capacidad de carga de los puertos, y un 50% de incremento en los pasajeros movilizados por los aeropuertos.

Como se puede ver el esfuerzo del Gobierno Nacional está concentrado en la red vial primaria donde se esperan mejoras muy importantes (llegando hasta el 100% de mejora en la red vial primaria en los próximos 5 años) y no se planea ningún esfuerzo por mejorar las redes viales secundarias y terciarias (que representan más del 90% de la red vial del país), las cuales, especialmente estas últimas están en un estado crítico. Estas últimas redes son las que dan salida a los municipios medianos y pequeños a la red vial primaria. La red vial terciaria del país es prácticamente toda en afirmado y/o tierra y prácticamente en un 100% se encuentra en regular o mal estado (Ministerio de Transporte, 2013a).

Considerando que el Gobierno Nacional logre las metas en dobles calzadas para la red vial primaria y se inicie un programa de apoyo a los departamentos y municipios para mejorar las redes viales secundaria y terciaria se puede proponer un escenario de mejora en el componente de infraestructura en un 20% entre 2013 y 2032. Otro escenario sería aquel en donde se cumplen las metas para la red vial primaria pero el país no hace esfuerzos por mejorar las redes viales secundarias y terciarias, lo que representaría un escenario de deterioro en un 15% del componente de infraestructura entre 2013 y 2032.

7.1.4 Seguridad

El Índice Global de Competitividad de Colombia 2014 – 2015 del Foro Económico Mundial muestra que el país ocupa cerca de los últimos lugares en temas asociados a la seguridad. En el costo para los negocios por el terrorismo en Colombia ocupa la posición 138 de 144 países, en el costo para los negocios por la criminalidad y la violencia ocupa la posición 134 de 144 países y en el costo del crimen organizado la posición 139 de 144 países (solo hay 5 países en una ubicación peor que la de Colombia) (World Economic Forum, 2014).

Se espera que con la solución del conflicto armado se mejorará el costo para los negocios por el terrorismo, pero los otros costos asociados a la violencia y la criminalidad seguirán afectando de manera importante la competitividad del país. Igual información se reporta en la Encuesta de las Empresas Mineras 2012 – 2013 del Instituto Fraser en donde el componente nivel de seguridad (incluye seguridad física debido a la amenaza de un ataque de terroristas, criminales, grupos guerrilleros, etc.) muestra que para un 60% de las empresas la seguridad del país impide levemente la inversión, para un 24% disuade levemente la inversión y un 6% no haría inversión en el país por los problemas de seguridad. En estos temas Colombia también tiene mucho margen de mejora.

Considerando que el proceso de paz actual (que incluya el Ejército de Liberación Nacional) sea exitoso, que se implemente de manera adecuada en las regiones, se puede plantear un escenario en el que se aumenta la

percepción de seguridad en un 15% entre 2013 y 2032, debido a una reducción del conflicto armado en el país. Por el contrario, el escenario bajo estaría representado por una situación en donde el proceso de paz actual es exitoso pero su implementación en las regiones es muy difícil, algunos de los excombatientes vuelven a las armas después de varios años, y no es posible acordar con el Ejército de Liberación Nacional un proceso de paz, en este escenario se plantea una disminución de la percepción de seguridad en un 20% entre 2013 y 2032. El escenario base toma la misma percepción actual durante todo el tiempo de simulación.

7.1.5 Estabilidad jurídica

El Índice Global de Competitividad de Colombia 2014 – 2015 del Foro Económico Mundial muestra que una ubicación preocupante del país en temas asociados con las regulaciones y la estabilidad jurídica. En el peso o agobio de la regulación gubernamental el país ocupó el puesto 122 de 144 países, en la eficiencia del marco legal del país para resolver conflictos el puesto 91 de 144, y en la eficiencia del marco legal en regulaciones desafiantes igualmente el puesto 91 de 144 países (World Economic Forum, 2014).

Información similar se reporta en la Encuesta de las Empresas Míneras 2012 – 2013 del Instituto Fraser en donde el componente de Incertidumbre acerca de la administración, la interpretación, o aplicación de las normas existentes muestra que para un 24% de las empresas esta condición impide levemente la inversión, para un 10% disuade levemente la inversión y un 1% no haría inversión en el país debido a esta condición. Con respecto a las normas ambientales del país para un 27% de las empresas esta condición impide levemente la inversión, para un 16% disuade levemente la inversión y un 3% no haría inversión en el país debido a esta condición. En estos temas Colombia también tiene mucho margen de mejora. Con respecto a la componente de duplicaciones y contradicciones regulatorias (incluye, solapamiento entre departamentos federales/provinciales, federales/estatales, etc.) para un 35% de las empresas esta condición impide levemente la inversión, para un 11% disuade levemente la inversión y un 1% no haría inversión en el país debido a esta condición. En estos temas Colombia igualmente tiene mucho margen de mejora.

En el ejercicio de Escenarios Míneros para Colombia se recalcó la importancia de la estabilidad de las reglas de juego para el sector minero. El constante cambio de la reglamentación ambiental afecta negativamente la atraktividad a la inversión. Se proponen entonces tres escenarios para esta variable. El escenario alto considera una mejora en la estabilidad jurídica del país, las duplicaciones y contradicciones regulatorias a diferentes niveles de gobierno se superan, y la incertidumbre acerca de la administración, la interpretación, o aplicación de las normas se reduce de manera importante, situación que representa un aumento del 20% entre 2013 y 2032 en la percepción de la estabilidad jurídica. Si por el contrario las normas siguen

cambiando constantemente, se tiene una regulación ambiental más pesada, la incertidumbre sobre la administración, la interpretación, o aplicación de las normas aumenta, y continúan las duplicaciones y contradicciones regulatorias a diferentes niveles de gobierno, esta situación representa un escenario bajo con disminución de la percepción de la estabilidad en un 15% entre 2013 y 2032. El escenario medio considera una percepción de estabilidad jurídica igual a la actual y constante durante toda la simulación.

Tabla 21 – Variables que intervienen en los escenarios de simulación.

	Variable	Trayectoria			Comportamiento
		Alta	Media	Baja	
Mercado internacional	Precio carbón	Escenario alto de EIA	Escenario base de EIA	Precios decrecientes con una tasa constante.	

	Variable	Trayectoria			Comportamiento
		Alta	Media	Baja	
	Precio Oro	Tasa de crecimiento constante del 1% anual hasta alcanzar valor máximo reportado en los últimos 10 años (promedio anual)	Escenario base presentado por CRU para la UPME	Decrecimiento exponencial hasta alcanzar valor mínimo reportado en los últimos 10 años (promedio anual)	<p>Precio de oro - USD/Oz</p> <p>Año</p> <p>— Histórico — Alto — Medio — Bajo</p>
Desarrollo tecnológico	Tasas de contaminación del aire por emisión de material particulado - carbón	La tasa de emisión disminuye en un 10% entre 2013 y 2032 debido a mejoras tecnológicas.	Se mantiene la tasa actual	La tasa de emisión aumenta en un 10% entre 2013 y 2032 debido a estancamiento de la tecnología.	<p>Tasa de emisión de material particulado - carbón ugr/m3/Mton</p> <p>Año</p> <p>— Histórico — Bajo — Medio — Alto</p>

Variable	Trayectoria			Comportamiento
	Alta	Media	Baja	
Tasa de contaminación del agua por uso de mercurio -oro	La tasa de contaminación disminuye en un 10% entre 2013 y 2032 debido a mejoras tecnológicas.	Se mantiene la tasa actual	La tasa de contaminación aumenta en un 10% entre 2013 y 2032 debido a estancamiento de la tecnología.	
Tasa de contaminación del agua por uso de cianuro - oro	La tasa de contaminación disminuye en un 10% entre 2013 y 2032 debido a mejoras tecnológicas.	Se mantiene la tasa actual	La tasa de contaminación aumenta en un 20% entre 2013 y 2032 debido a estancamiento de la tecnología.	

Variable	Trayectoria			Comportamiento
	Alta	Media	Baja	
Costos	Los costos unitarios de producción disminuyen a una tasa constante entre 2013 y 2032 por mejoras en eficiencia tecnológica y economías de escala	Proyección de costos de Wood Macanzie para la UPME	Los costos unitarios de producción aumentan a una tasa constante entre 2013 y 2032 porque no hay avances en la tecnología	<p>costo de operación de carbón térmico de exportación - USD/Ton</p> <p>Año</p> <p>— Histórico — Bajo — Medio — Alto</p>
Productividad	Mejora la productividad un 10% entre 2013 y 2032 por mejoras en tecnología	La productividad actual se mantiene	Disminuye la productividad un 10% entre 2013 y 2032 porque no hay avances en tecnología	<p>Productividad Mton/persona/año</p> <p>Año</p> <p>— Histórico — Alto — Medio — Bajo</p>

	Variable	Trayectoria			Comportamiento
		Alta	Media	Baja	
Infraestructura	Componente de infraestructura en atraktividad	Mejora el componente en un 20% entre 2013 y 2032 por mejoras en infraestructura	Valor actual del componente	Disminución del componente en un 15% entre 2013 y 2032 por deterioro de la infraestructura actual	
Seguridad	Componente de seguridad en atraktividad	Mejora el componente en un 15% entre 2013 y 2032 por aumento de la seguridad percibida	Valor actual del componente	Disminución del componente en un 20% entre 2013 y 2032 por disminución de la seguridad percibida	

	Variable	Trayectoria			Comportamiento																														
		Alta	Media	Baja																															
Estabilidad jurídica y legislativa	Componente de estabilidad jurídica en atractividad	Mejora el componente en un 20% entre 2013 y 2032 percepción de estabilidad en reglas de juego	Valor actual del componente	Disminuye el componente en un 15% entre 2013 y 2032 por disminución en la percepción de estabilidad en reglas de juego	<p>The graph illustrates the projected impact of legal stability on attractiveness under three scenarios: 'Alto' (High), 'Medio' (Medium), and 'Bajo' (Low), compared to historical data. The historical value remains constant at 1.0. The 'Alto' scenario shows a steady increase to 1.2 by 2030, while the 'Bajo' scenario shows a steady decrease to approximately 0.85. The 'Medio' scenario remains constant at 1.0.</p> <table border="1"> <caption>Data for the line graph: Efecto de la estabilidad jurídica sobre atractividad</caption> <thead> <tr> <th>Año</th> <th>Histórico</th> <th>Alto</th> <th>Medio</th> <th>Bajo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2010</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>2015</td> <td>1.0</td> <td>1.05</td> <td>1.0</td> <td>0.95</td> </tr> <tr> <td>2020</td> <td>1.0</td> <td>1.1</td> <td>1.0</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>2025</td> <td>1.0</td> <td>1.15</td> <td>1.0</td> <td>0.85</td> </tr> <tr> <td>2030</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> <td>1.0</td> <td>0.8</td> </tr> </tbody> </table>	Año	Histórico	Alto	Medio	Bajo	2010	1.0	1.0	1.0	1.0	2015	1.0	1.05	1.0	0.95	2020	1.0	1.1	1.0	0.9	2025	1.0	1.15	1.0	0.85	2030	1.0	1.2	1.0	0.8
Año	Histórico	Alto	Medio	Bajo																															
2010	1.0	1.0	1.0	1.0																															
2015	1.0	1.05	1.0	0.95																															
2020	1.0	1.1	1.0	0.9																															
2025	1.0	1.15	1.0	0.85																															
2030	1.0	1.2	1.0	0.8																															

A partir de combinaciones de las distintas trayectorias que puedan tomar las condiciones exógenas a futuro, se construyen de manera cuantitativa para realizar la simulación de los escenarios mineros para Colombia a 2032. Con los escenarios construidos, se procederá a la evaluación de estrategias para el sector. A continuación se describe cada escenario para cada condición exógena.

Tabla 22 – Escenarios de simulación (UPME & UNAL, 2013).

Variable \ Escenario	Los años maravillosos	Unas de cal y otras de arena	Sin el pan y sin el queso
Precio	Alto	Alto	Bajo
Tasas de contaminación del aire por emisión de material particulado - carbón	Bajo	Medio	Alto
Tasa de contaminación del agua por uso de mercurio -oro	Bajo	Medio	Alto
Tasa de contaminación del agua por uso de cianuro - oro	Bajo	Medio	Alto
Costos	Bajo	Medio	Alto
Productividad	Alto	Medio	Bajo
Componente de infraestructura en atraktividad	Alto	Medio	Bajo
Componente de seguridad en atraktividad	Alto	Medio	Bajo
Componente de estabilidad jurídica en atraktividad	Alto	Medio	Bajo

7.2 Resultados esperados para el sector minero

Se presenta a continuación la descripción de los resultados que arroja la simulación de los escenarios descritos en la sección anterior: *Los años maravillosos*; *Unas de cal y otras de arena*; *Sin el pan y sin el queso*. Las gráficas de cada escenario se presentan en la Tabla 23. Para fines comparativos, se considera además un escenario *Base* el cual supone la trayectoria media para todas las variables, con el objetivo de comparar el comportamiento de los demás escenarios.

7.2.1 Escenarios a 2032 para el Carbón

En la Tabla 23 se presentan los resultados de la simulación de los escenarios para la industria carbonífera en Colombia. En primer lugar, se espera que ante una época de precios altos de carbón

térmico y carbón metalúrgico, se dé un incremento en la producción con respecto al desempeño mostrado en el escenario Base. A su vez, en el escenario *Sin el Pan y sin el queso*, caracterizado por una época de precios bajo, la producción de este mineral cae con respecto al desempeño mostrado en el escenario Base. Esta caída es mucho más notable en el caso del carbón térmico.

El logro este crecimiento de la producción de carbón en el país, no obstante, estará sujeto a grandes inyecciones de capital en el sector para impulsar actividades de exploración que lleven al descubrimiento de nuevas reservas de carbón térmico, así como al desarrollo de las reservas probadas de carbón térmico además de las reservas de carbón metalúrgico. Similar al escenario Base, en el caso del carbón metalúrgico existe actualmente un stock grande de reservas que permitiría lograr las tasas de extracción mostradas en la Tabla 23. Por lo tanto, no se hace necesario llevar a cabo actividades de exploración para el descubrimiento de nuevas reservas, al menos durante las siguientes dos décadas. Estas necesidades de inversión son, obviamente, bastante reducidas en el escenario *Sin el Pan y sin el queso*, requiriéndose de inversiones anuales inferiores a los 300 millones de dólares solamente hasta el año 2020 para actividades de exploración y desarrollo en el caso del carbón térmico, y de inversiones anuales cercanas a los 40 mil dólares entre 2020 y 2032 para el desarrollo de reservas de carbón metalúrgico.

En cuanto a los aspectos socio-económicos y ambientales, el crecimiento que registra el sector carbonífero y de sus precios bajo los escenarios *Los Años Maravillosos* y *Unas de Cal y Otras de Arena*, traerá consigo un incremento cercano al 50% respecto al escenario Base, en la recaudación de impuestos a la renta e ingresos por regalías para el estado colombiano. Como se observa en la Tabla 23, los mayores incrementos se registrarían en la recaudación del impuesto a la renta, producto tanto de los mayores valores en producción y precios, como de las mejoras en productividad que conlleva a unas mayores ganancias en la industria. Es de anotar que en estos escenarios, el logro de los incrementos en producción antes mencionados requerirá de la contratación de más personal a fin de poder ampliar la capacidad de extracción de carbón térmico y metalúrgico.

Los desarrollos técnicos y tecnológicos, por su parte, permiten además mitigar los impactos ambientales negativos tales como la generación de material particulado ligada a la producción de carbón. En este sentido, si bien se llegan a registrar mayores niveles de contaminación por el incremento en la producción y en consecuencia la percepción de sus impactos asociados, esto sucede en menor proporción a los incrementos en producción de estos minerales. Además, los incrementos en la renta total generada en la industria generan la posibilidad de una mayor inversión en las

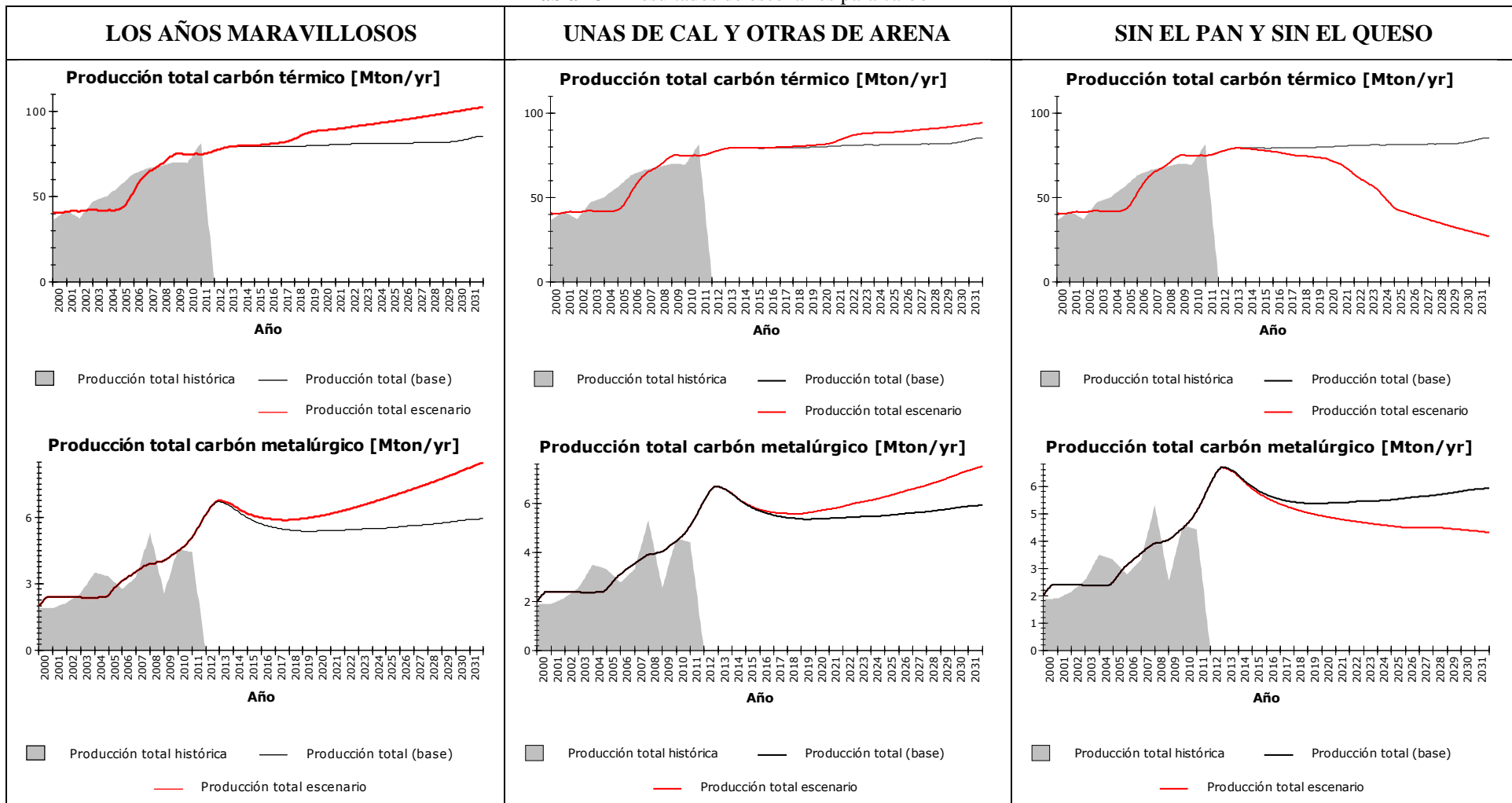
comunidades locales lo cual finalmente se traduce a su vez en una reducción de sus índices de necesidades básicas insatisfechas.

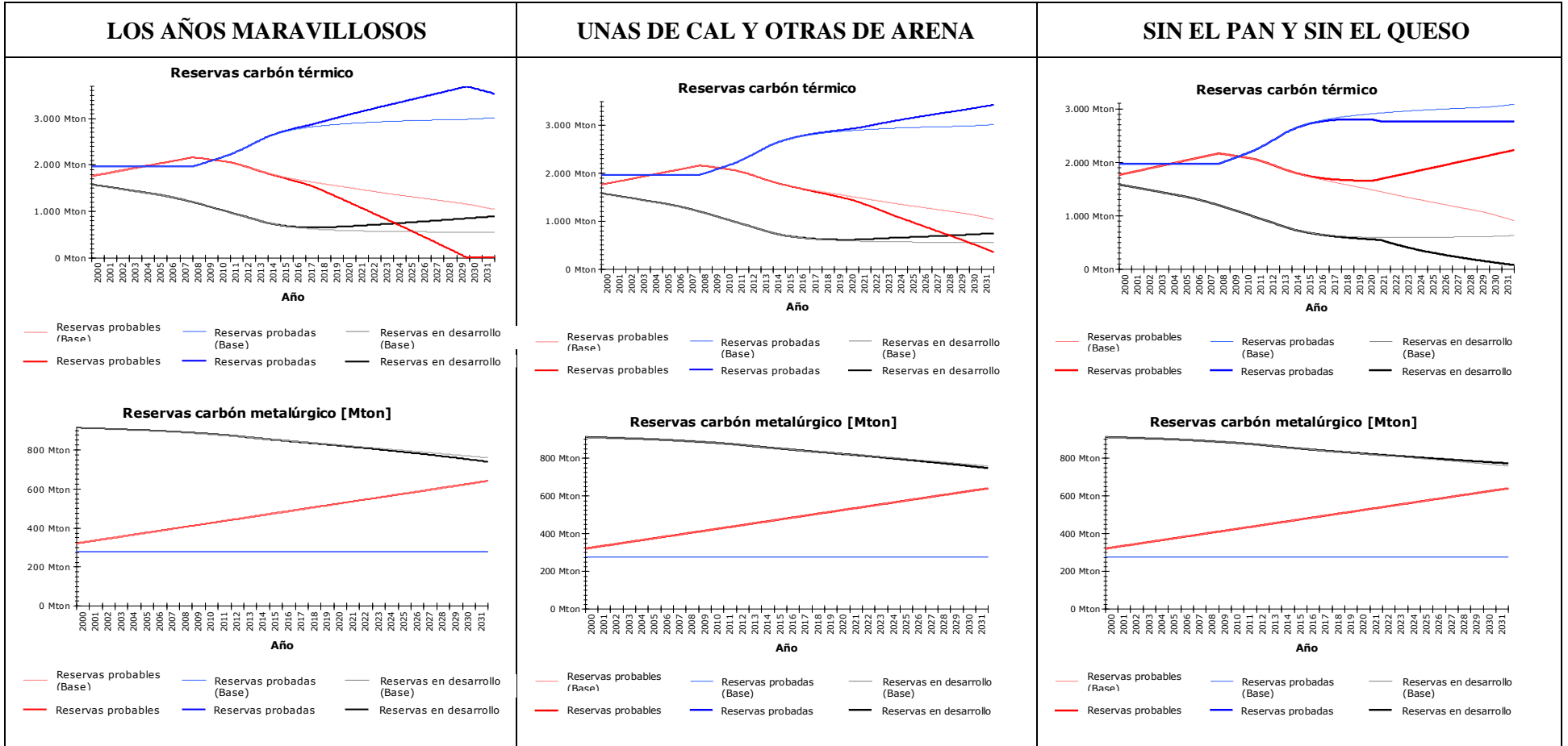
En general, se observa que bajo el escenario *Los Años Maravillosos* se crea un marco propicio para el crecimiento de la industria carbonífera colombiana. Precios altos, acompañado de importantes avances nacionales en términos de infraestructura, seguridad y estabilidad jurídica, así como en la tecnología empleada en la industria, dan pie para un crecimiento sustancial en la producción de minerales y metales y junto con esto en la renta generada desde este sector de la economía nacional. A su vez, los impactos positivos logrados ambiental y socialmente reducen el conflicto social alrededor de la minería logrando así un clima favorable para el desarrollo de la actividad minera en el país. Algo bastante similar, pero en menor grado, se observa en el escenario *Unas de Cal y Otras de Arena*

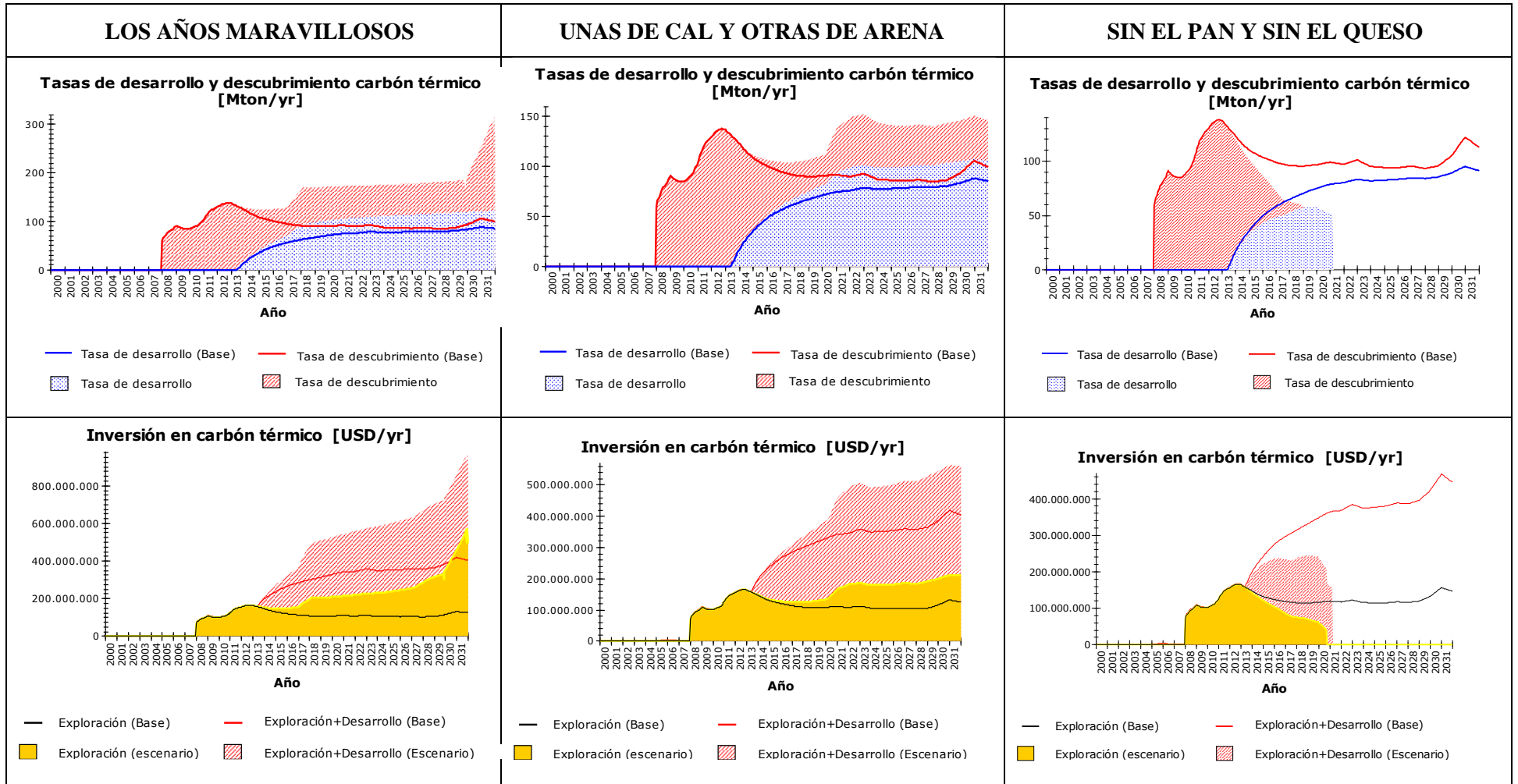
Lo contrario sucede en el escenario *Sin el Pan y sin el queso* en el que la recaudación por impuesto a la renta y regalías cae en cerca de un 50% con respecto al escenario Base. Esto, sumado al aumento del desempleo de las comunidades en las áreas de influencia de las compañías mineras por reducciones de su producción, lleva a incrementar los índices de necesidades básicas insatisfechas creándose así un descontento de las comunidades para con las compañías mineras.

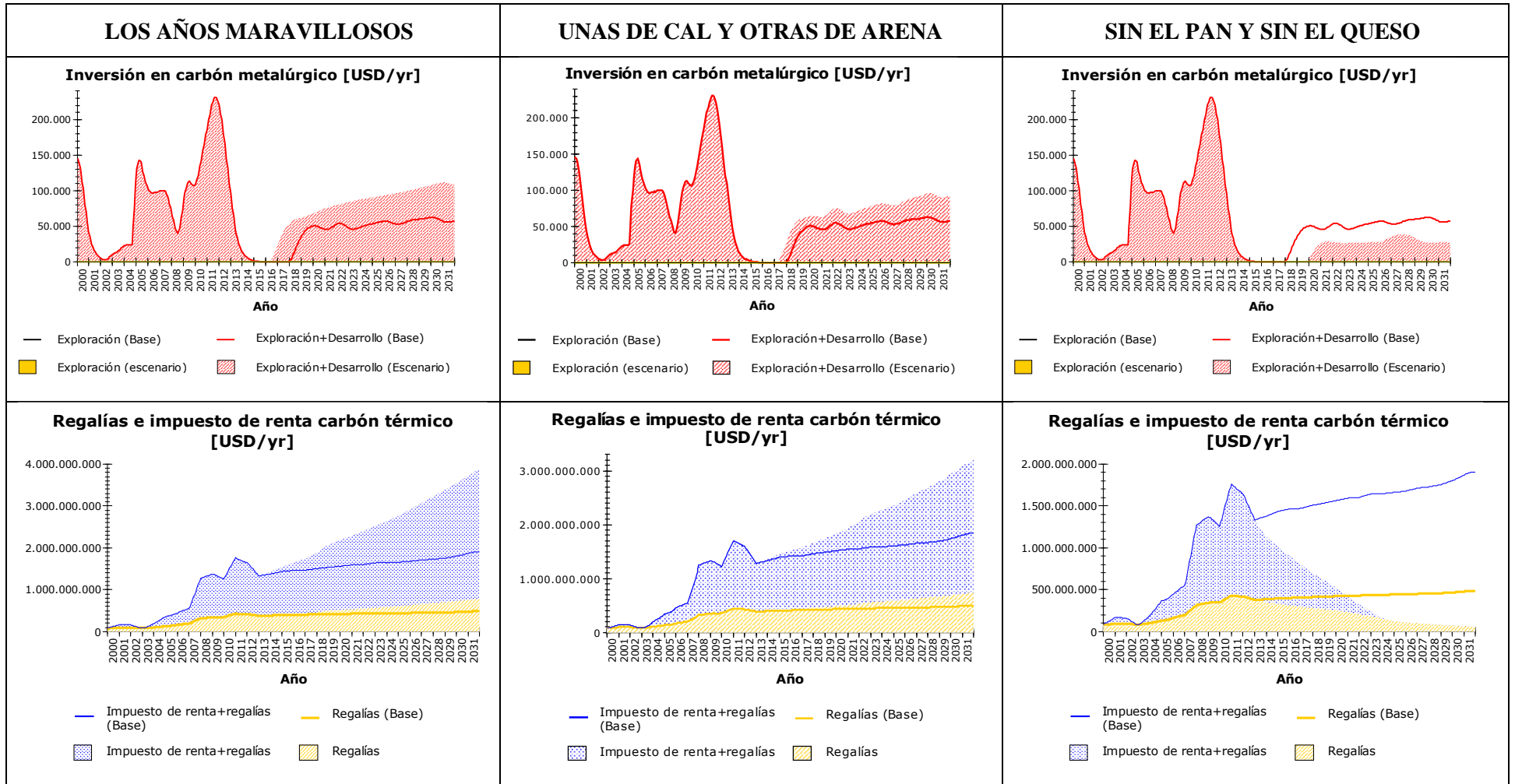
En resumen, de acuerdo a los resultados arrojados por el modelo de simulación, un aspecto clave dentro del desempeño futuro de la industria carbonífera en Colombia será la evolución de las condiciones de los mercados a los cuales pueda accederse y en especial del precio del recurso.

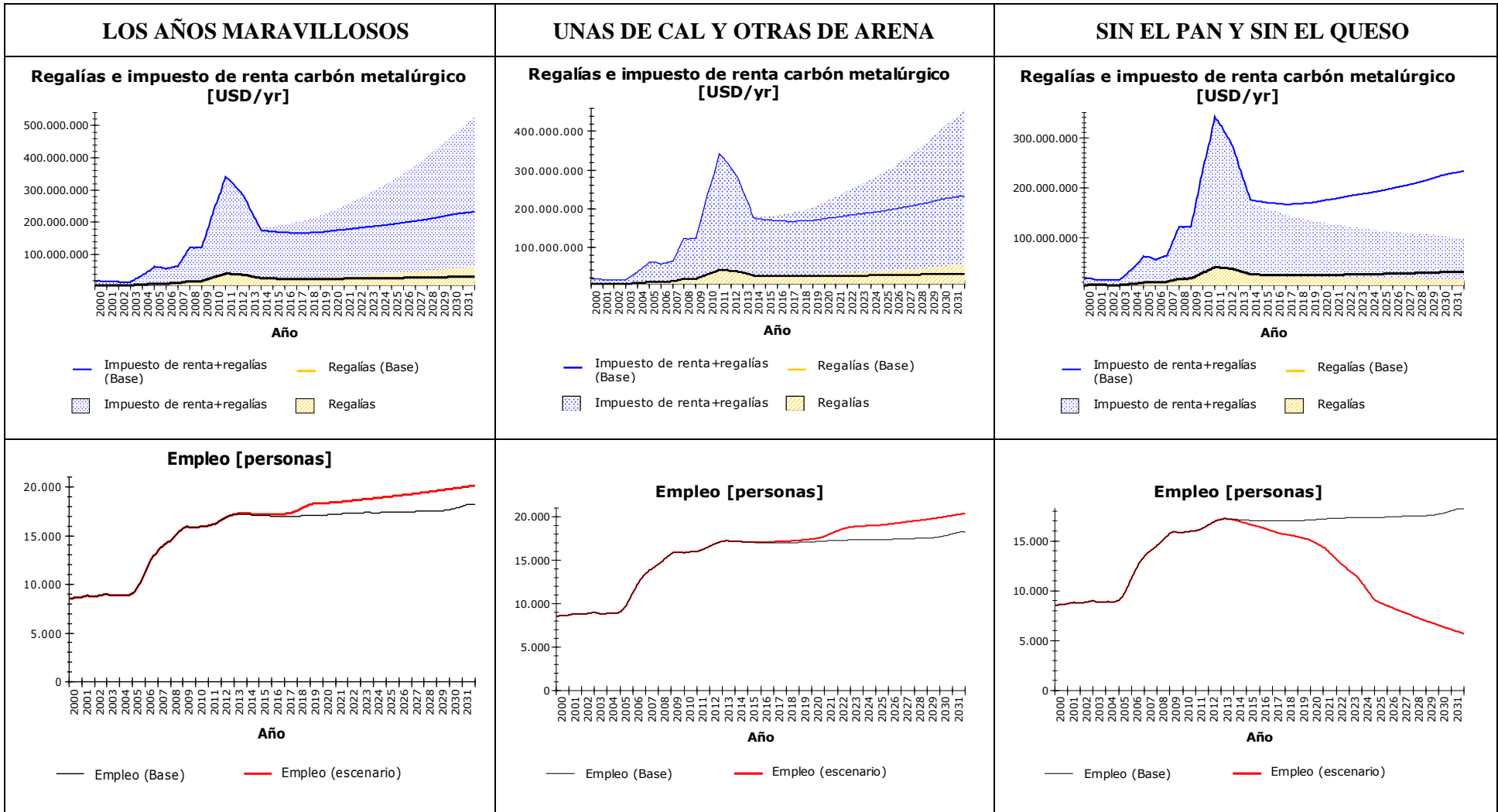
Tabla 23 – Resultados de escenarios para carbón

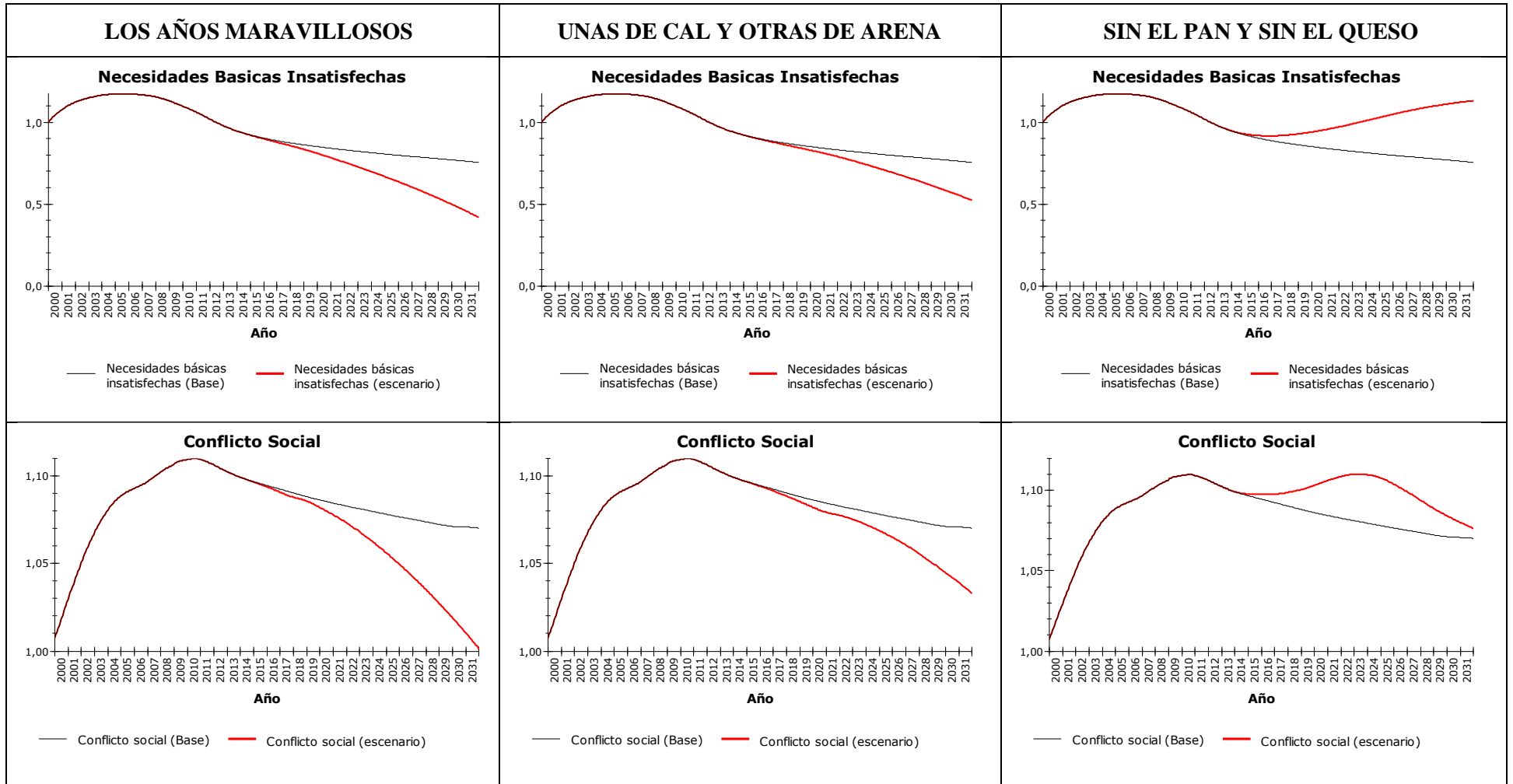


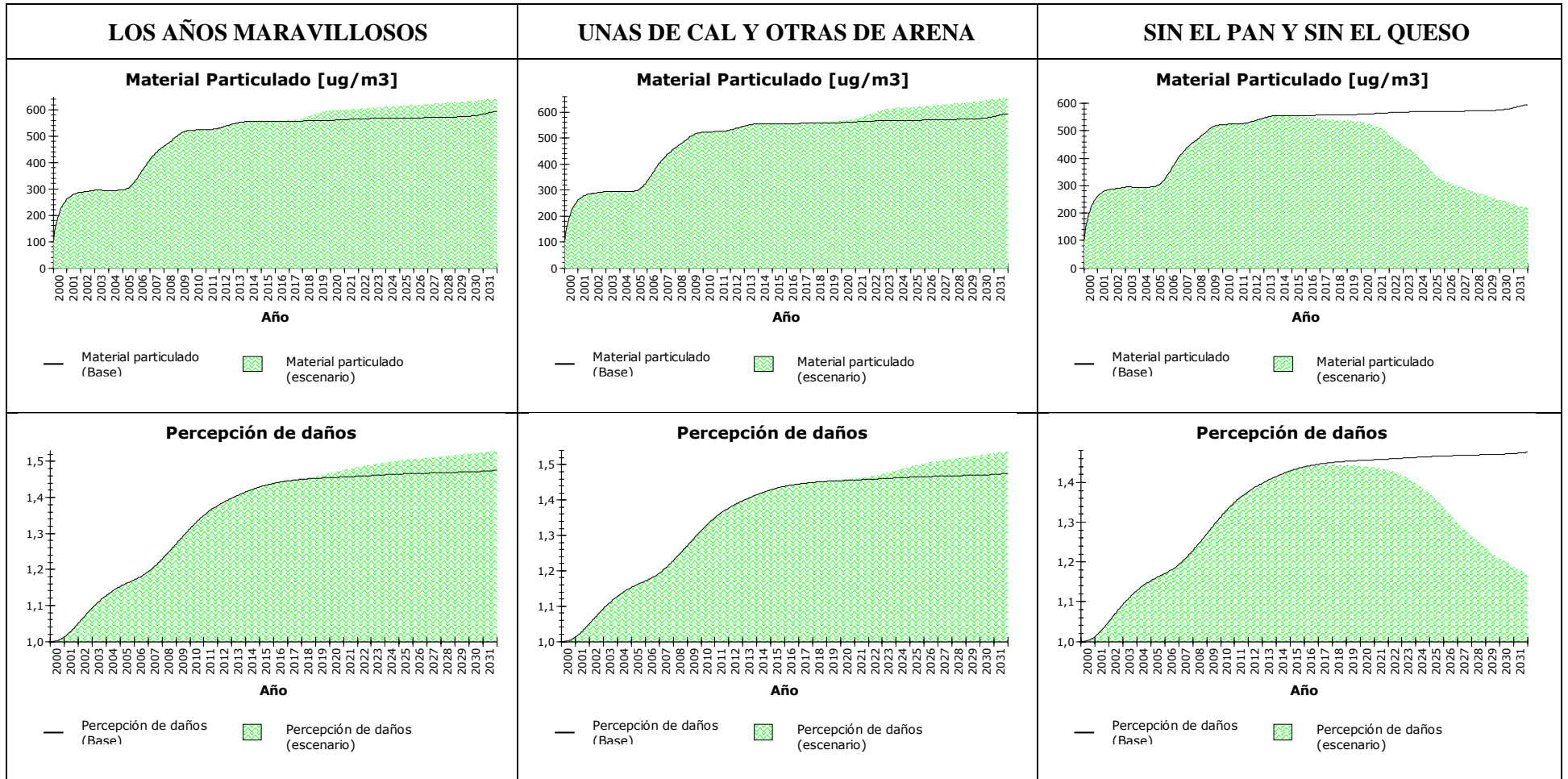


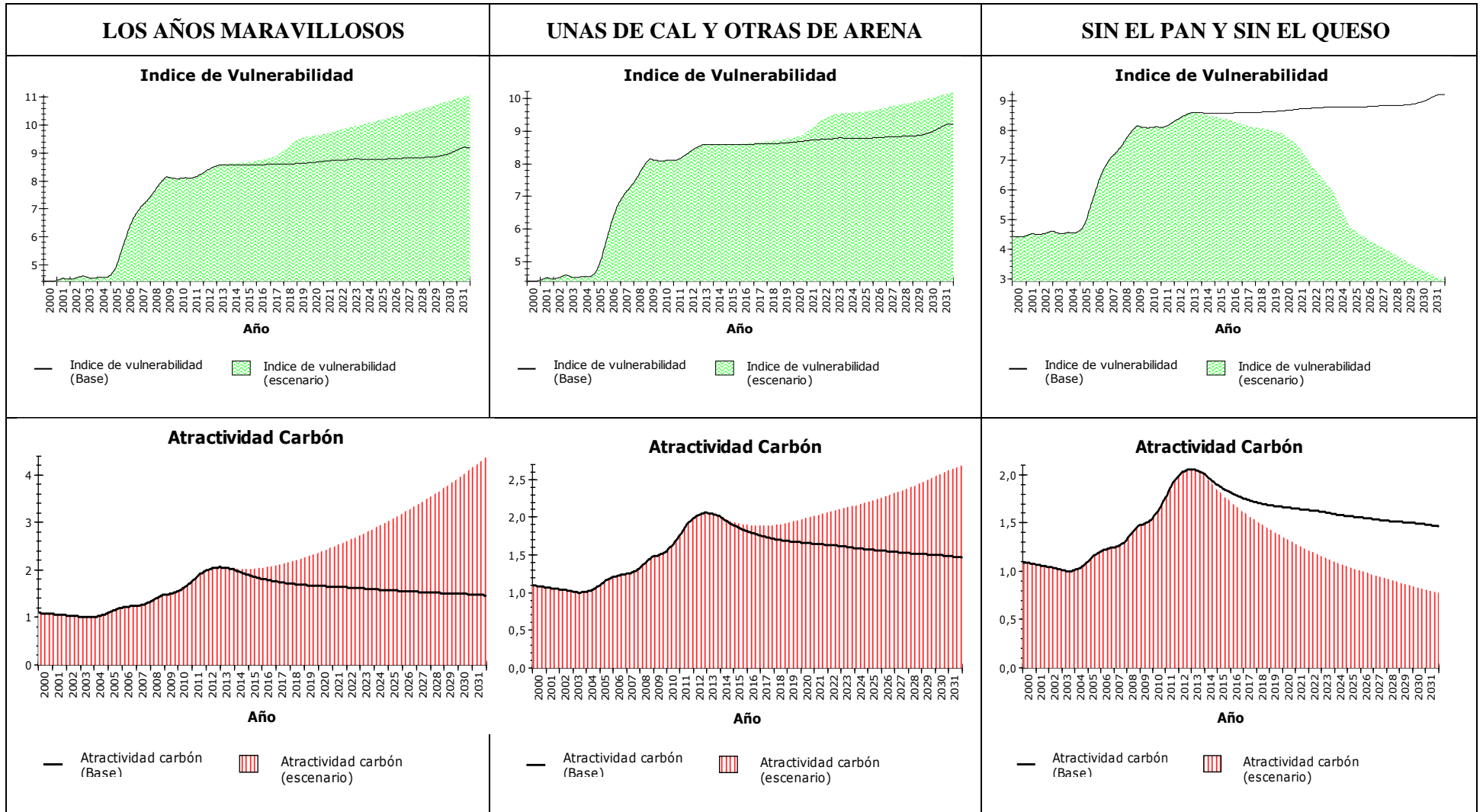












7.2.2 Escenarios a 2032 para el Oro

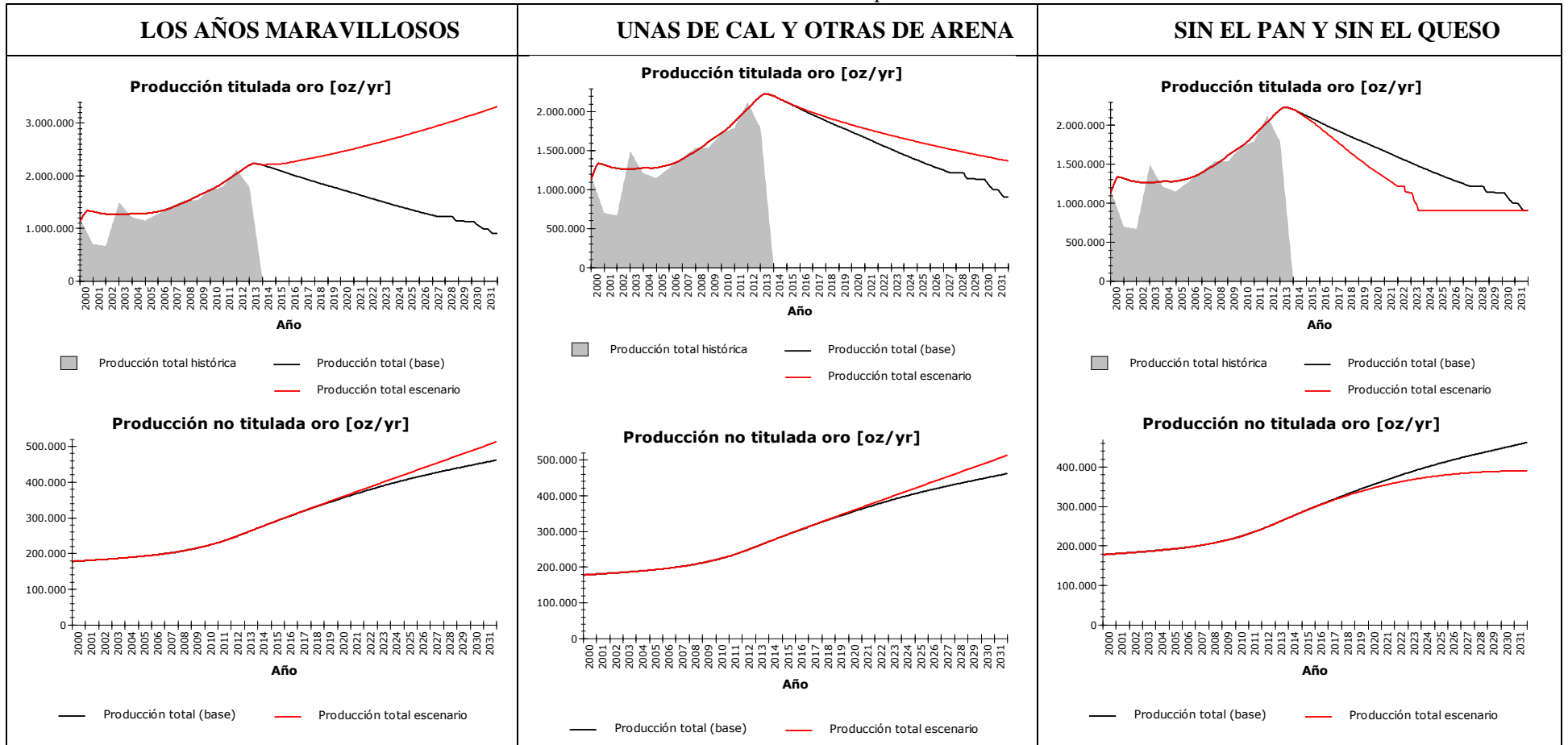
Los escenarios *Los Años Maravillosos* y *Unas de Cal y Otras* se caracterizan ambos por épocas de precios relativamente altos. Sin embargo, solamente bajo *Los Años Maravillosos* es posible llegar a observar una tendencia creciente en la producción titulada de oro, mientras que en *Unas de Cal y Otras* se observa la misma tendencia decreciente del escenario Base y sólo levemente superior a éste último (ver Tabla 24). De esta manera, el precio del oro no es el único determinante fundamental de la dinámica de la minería aurífera entre 2014 y 2032, sino que desarrollos tecnológicos que disminuyan los costos de extracción se tornan claves para el fortalecimiento de esta industria en el largo plazo.

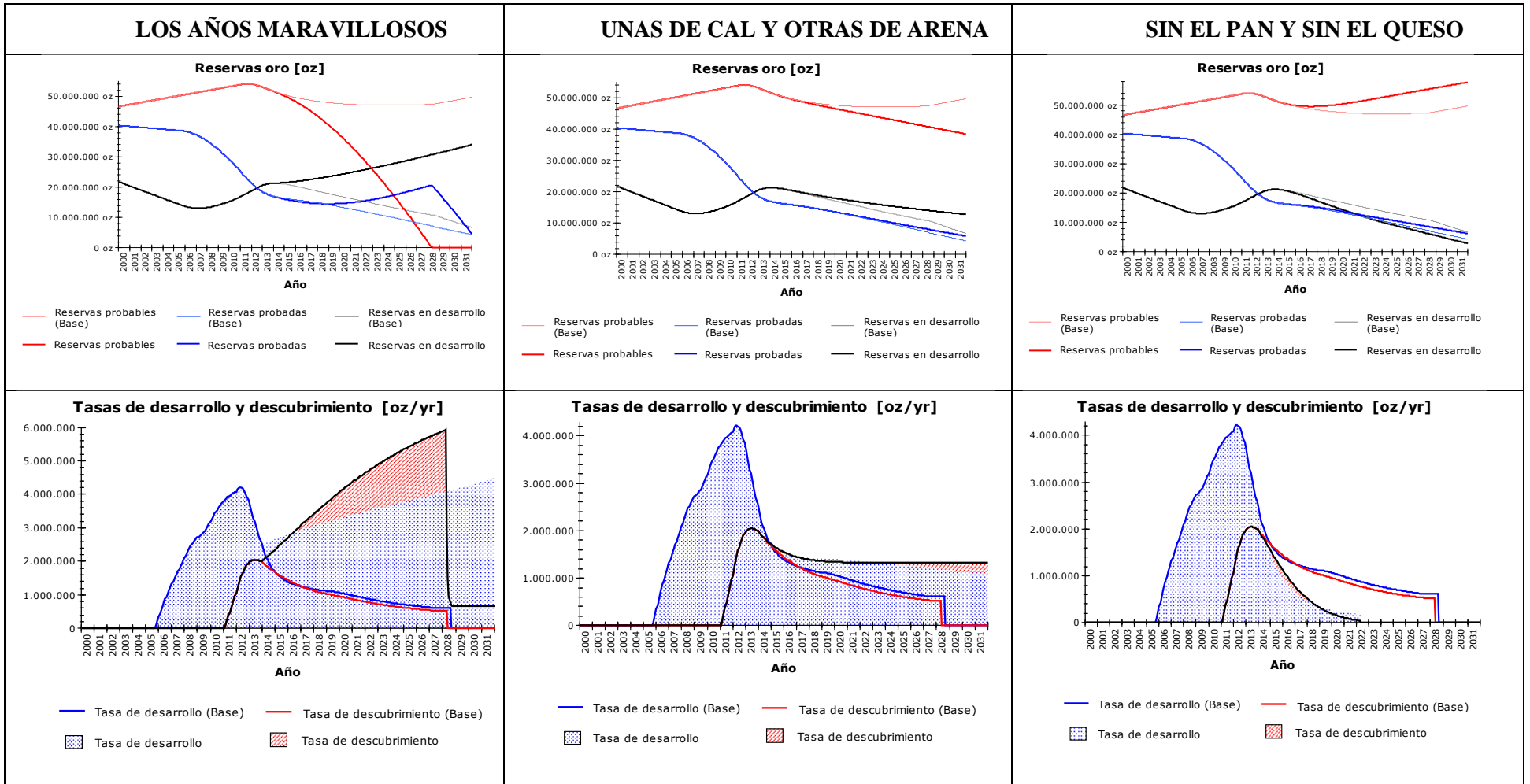
Únicamente bajo el escenario *Los Años Maravillosos* se requerirán montos de inversión significativamente mayores a los observados en el escenario Base durante el periodo 2014-2032. Por otro lado, bajo este mismo escenario se logrará alcanzar hacia 2032 una renta estatal por ingresos de regalías e impuestos a la renta recaudados, que llegará a superar el millón de dólares por año, parte de la cual es reinvertida en obras públicas construidas en los territorios donde se lleva a cabo la actividad minera. Si a esto se le suma el ingreso de aquellos hogares que acceden a las nuevas oportunidades de empleo generadas por esta industria, se prestan las condiciones para alcanzar menores valores en el índice de necesidades básicas insatisfechas de las comunidades locales y regionales, además de atenuar el conflicto social existente alrededor de la extracción de este metal precioso. Por el contrario, *Unas de Cal y Otras* y *Sin el Pan y sin el Queso* son escenarios bajo los que el conflicto social existente actualmente persiste hasta 2032.

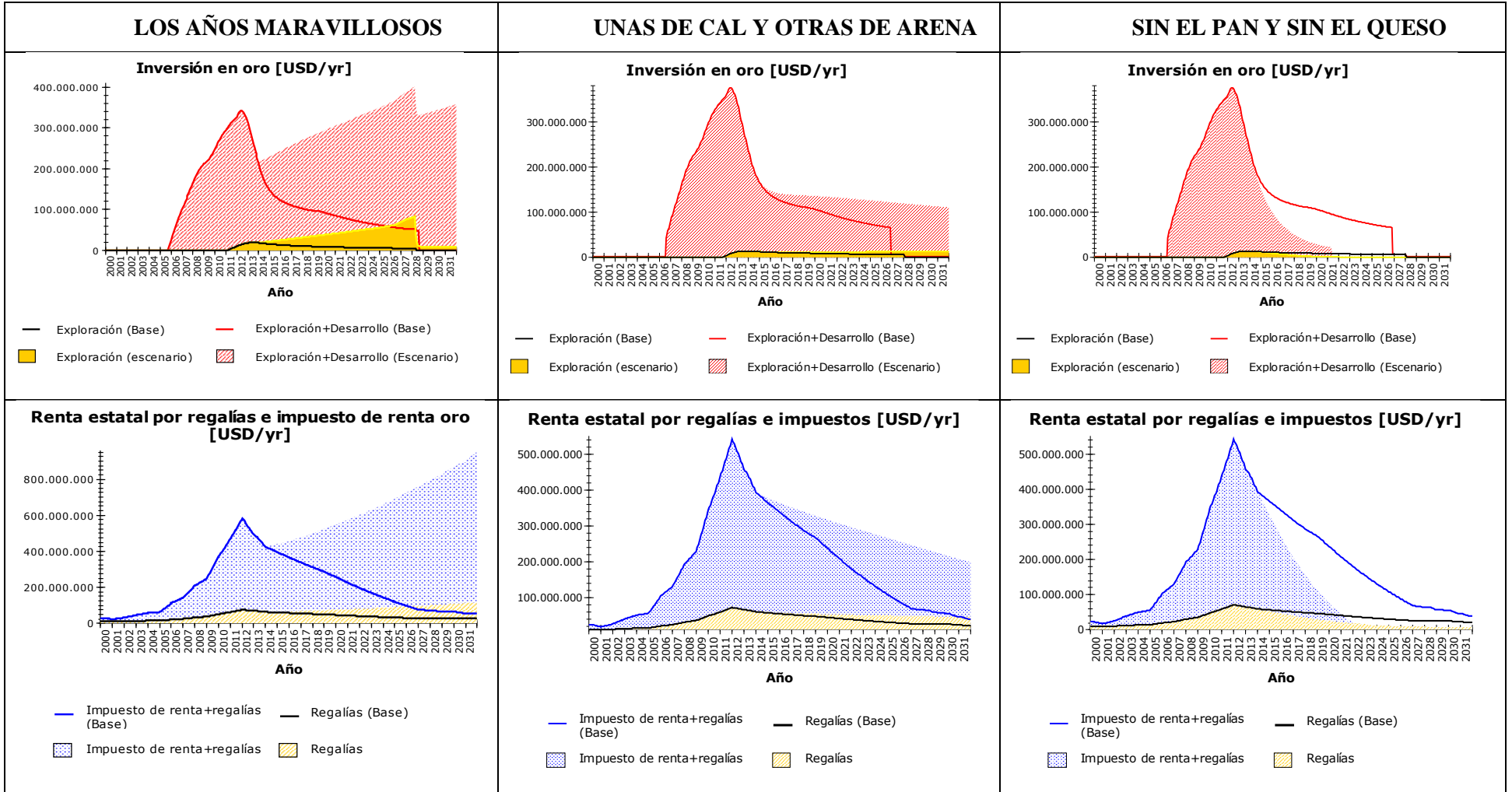
En general, se observa para el caso del oro que además del efecto de los precios es importante considerar el papel de los avances y adopción de técnicas y tecnologías que permitan elevar productividad y reducir los costos operacionales de la actividad extractiva de la minería de oro. Se suma a esto la necesidad de contar con políticas públicas orientadas a mejorar la infraestructura disponible en el país, las mejoras en seguridad y la estabilidad jurídica. Adicionalmente, y similar a lo observado en los resultados del modelo de simulación para la industria carbonífera, los desarrollos tecnológicos que permiten mejorar mitigación de los impactos ambientales y los efectos sociales de la minería de oro, llevan a reducir el conflicto social alrededor de la actividad así un clima favorable para el desarrollo de la minería de oro en el país.

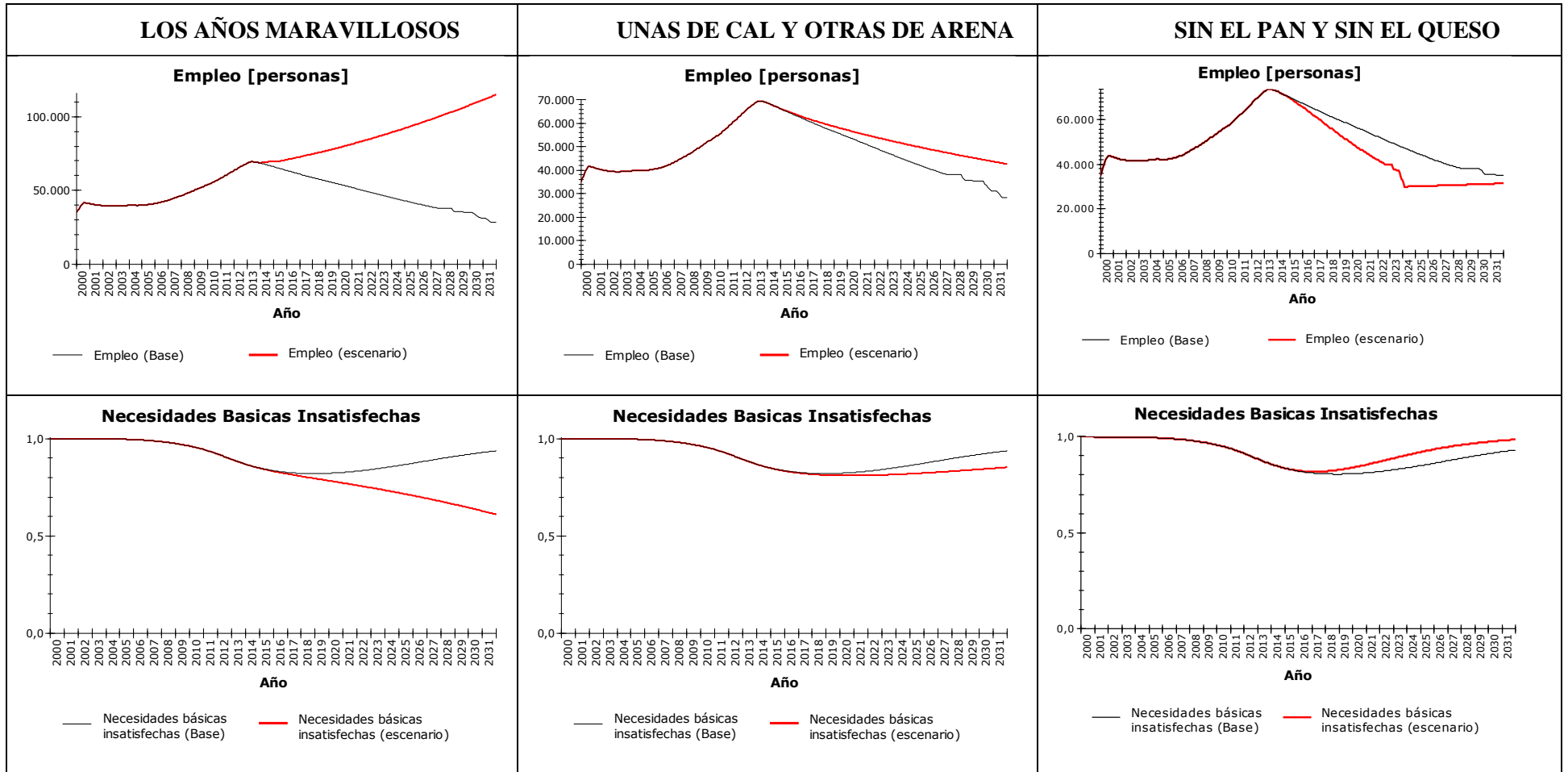
En relación a la producción de oro en minas sin título minero, esta no presenta, bajo cualquiera de los tres escenarios analizados, un incremento significativo y diferenciador de la tendencia registrada en el escenario Base. Esto obedece a que la dinámica de la minería no titulada no responde en igual grado o a las mismas causas que la minería aurífera titulada, pues aunque el precio disminuya, las UPM informales siguen produciendo oro en las mismas cantidades.

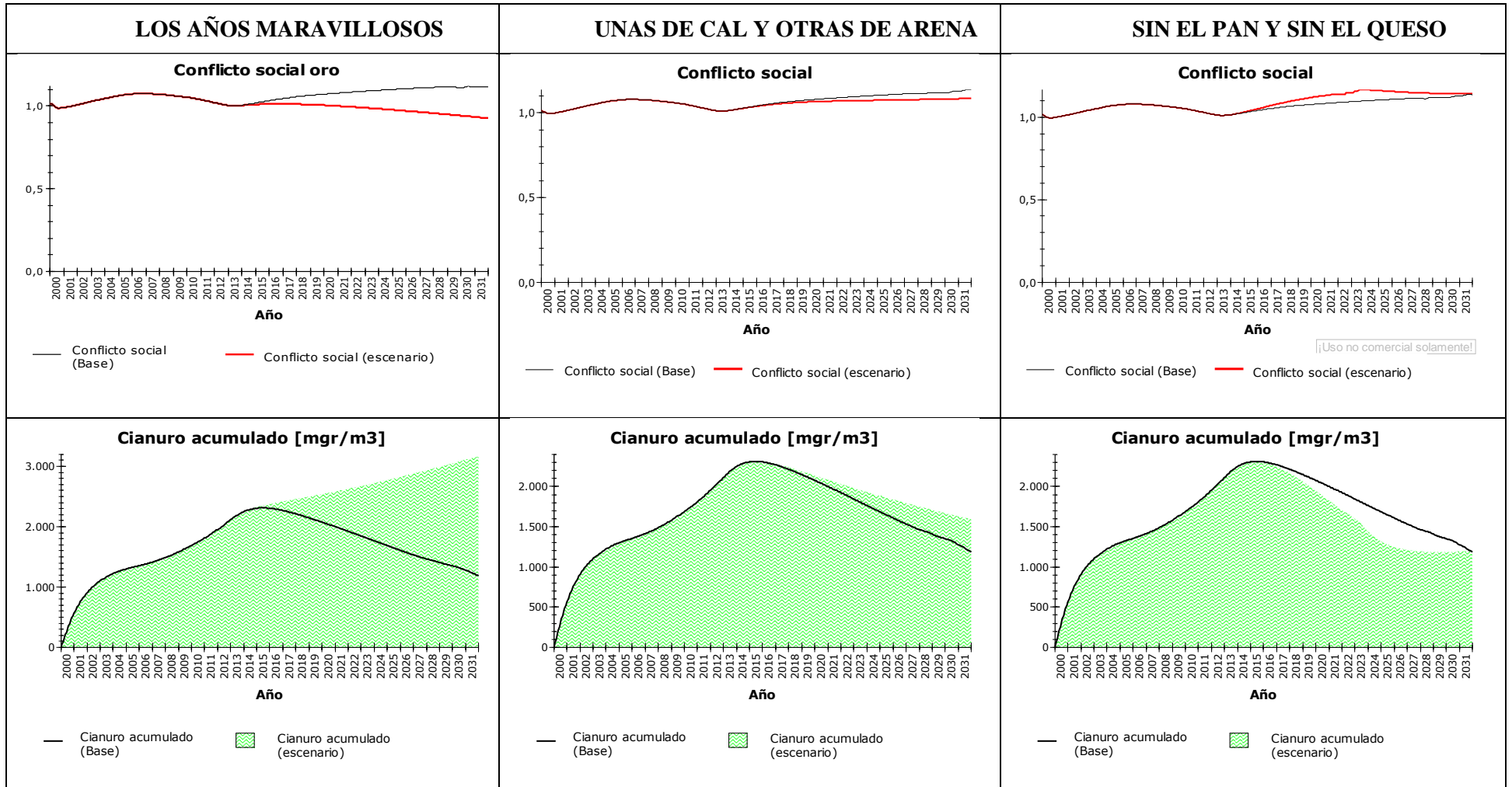
Tabla 24 – Resultados de escenarios para oro.

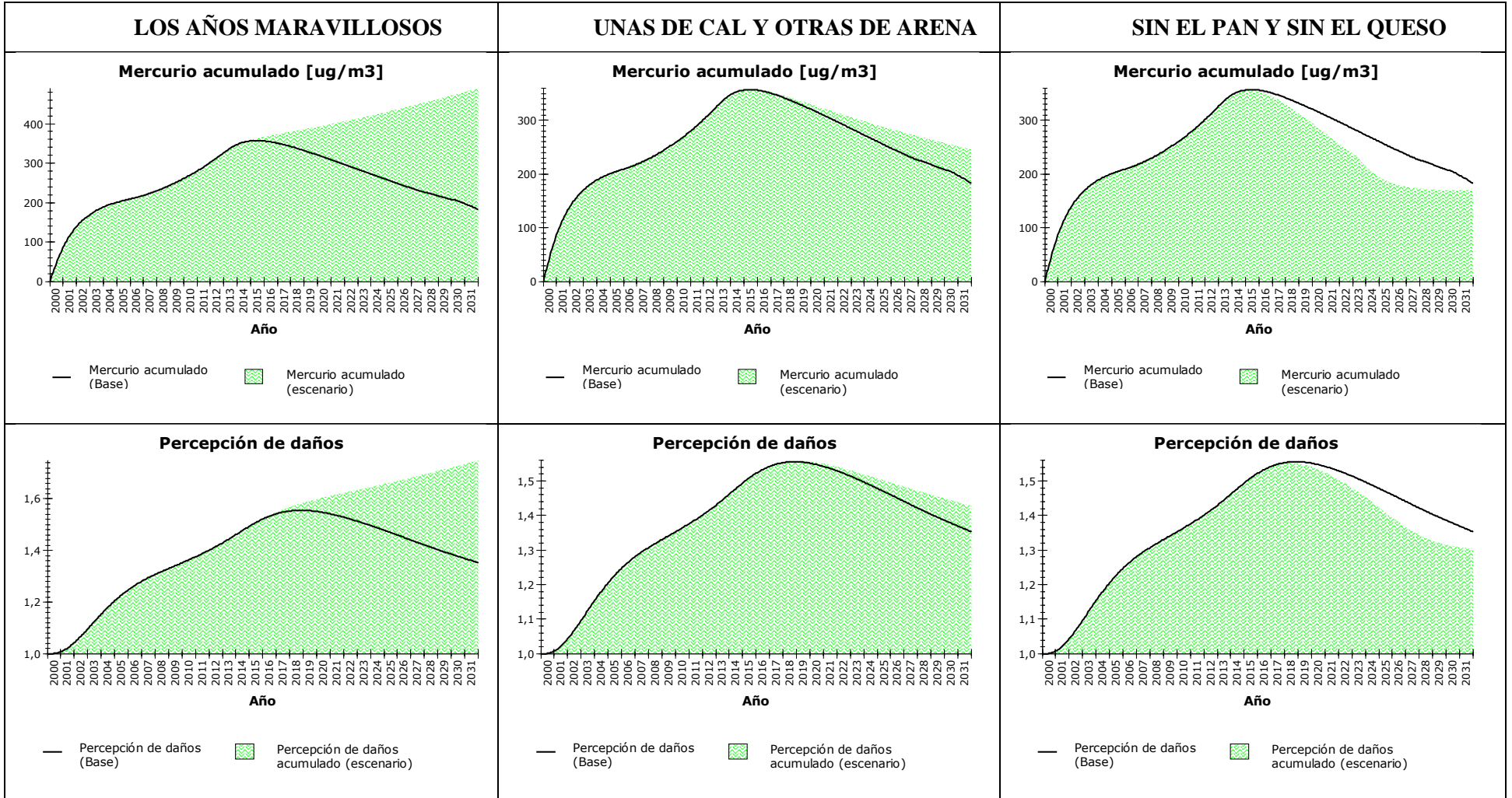


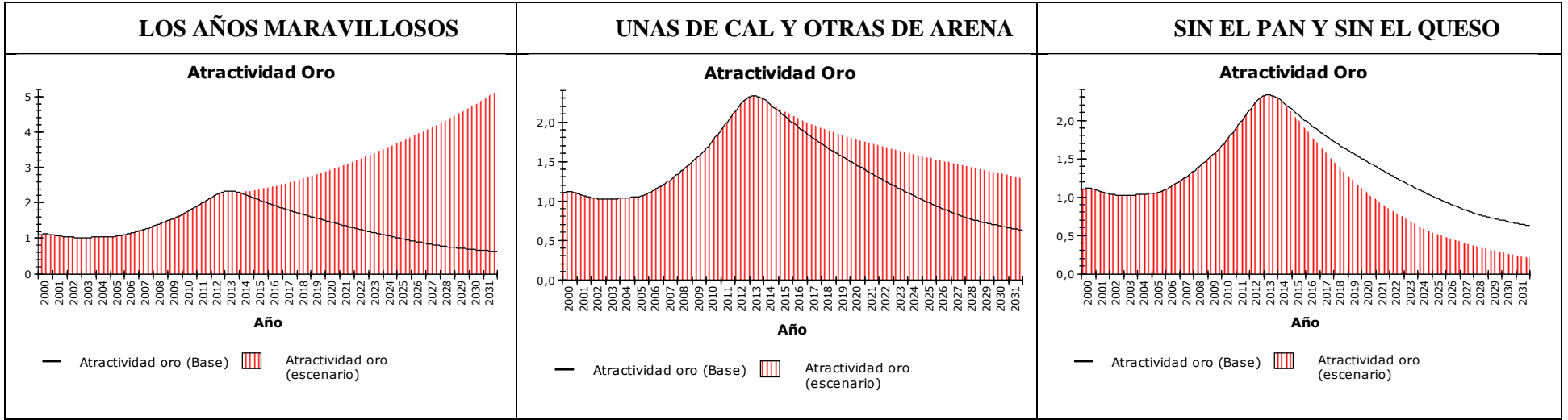












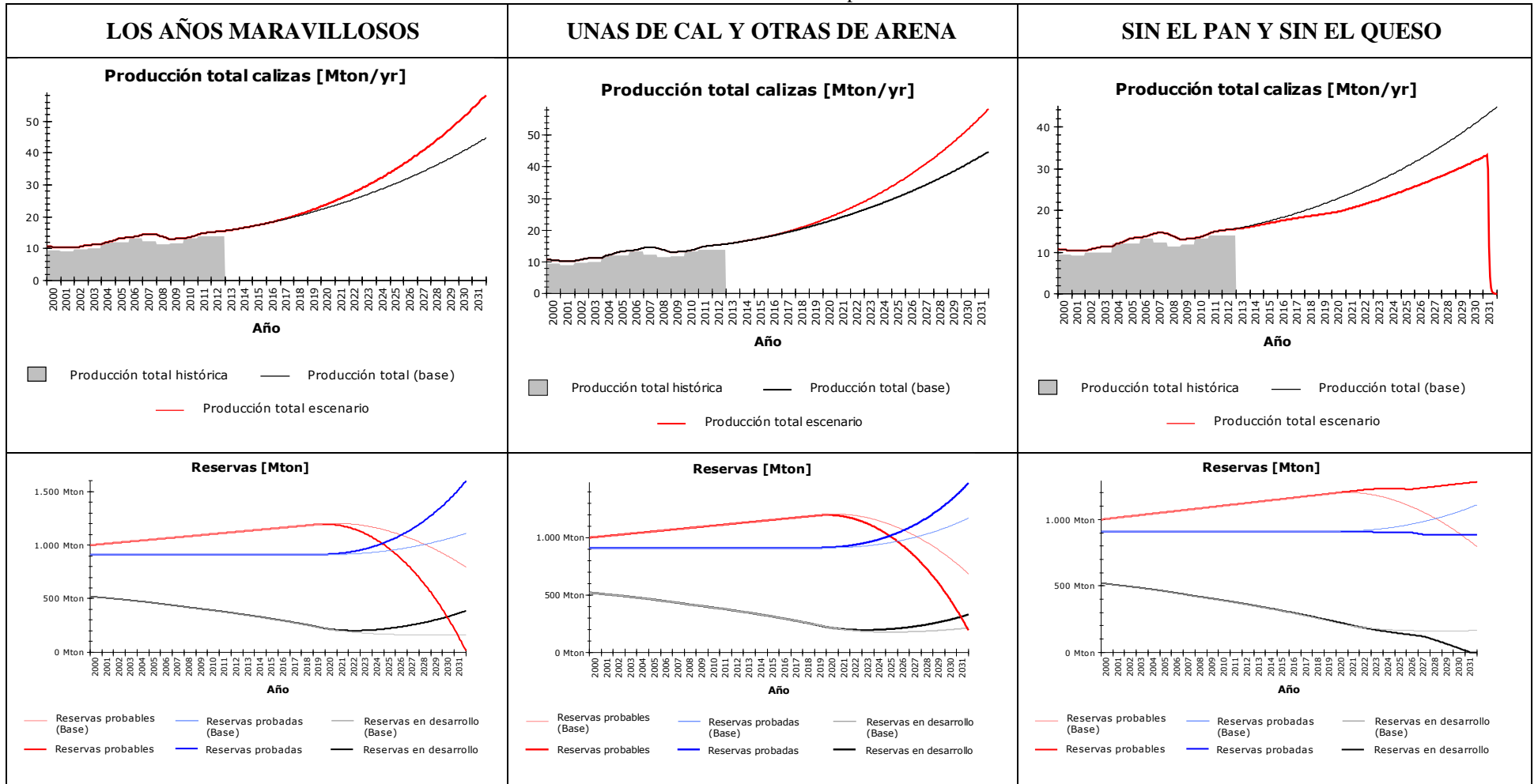
7.2.3 Escenarios a 2032 para Caliza

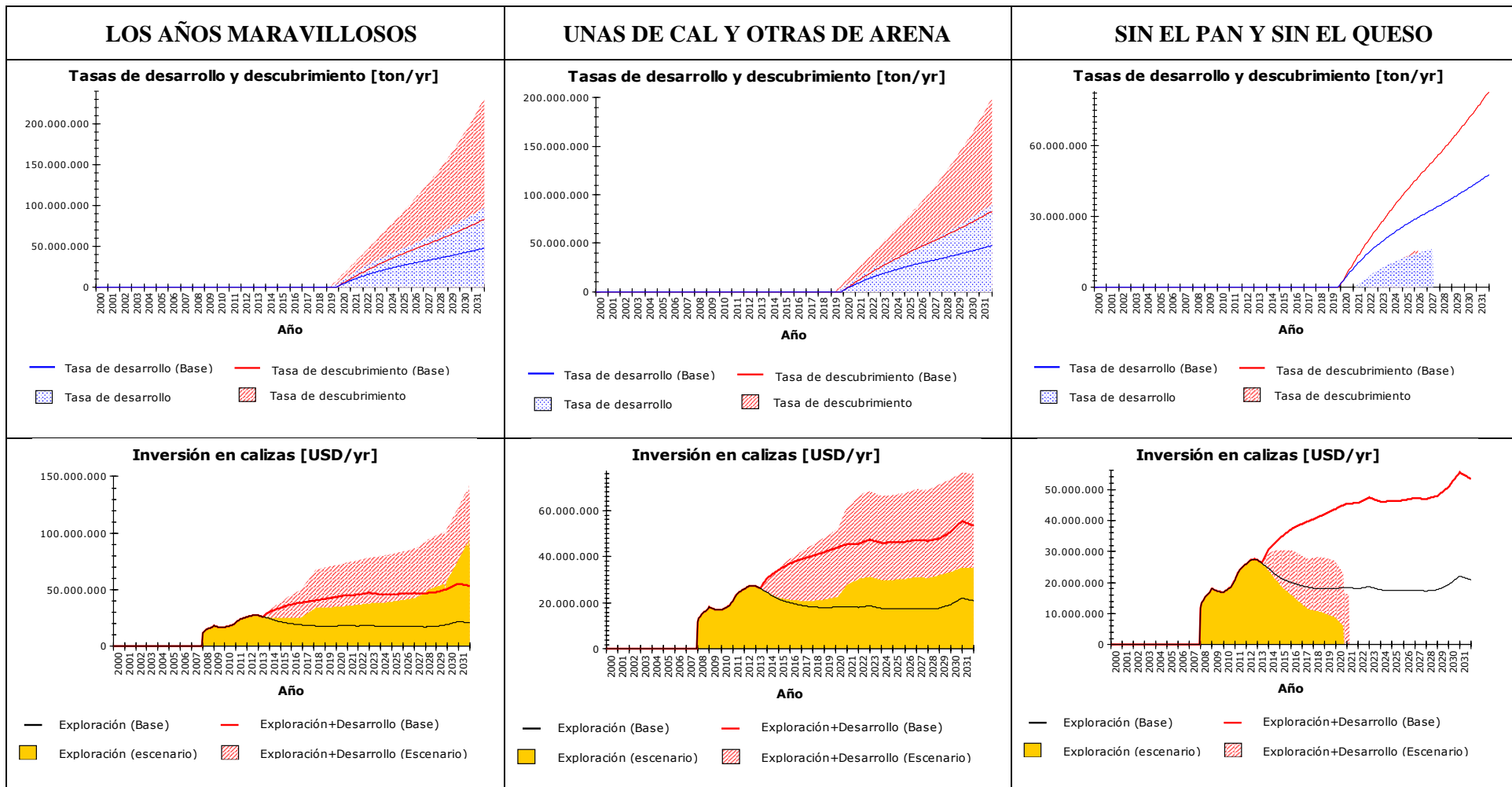
Como se mencionó anteriormente en la descripción del escenario Base, para las próximas dos décadas se espera un gran crecimiento en la demanda de materiales para la construcción de obras de infraestructura y vivienda, impulsando de esta forma la extracción de minerales como las caliza. Esta tendencia es posible observarla en los tres escenarios analizados: *Los Años Maravillosos*, *Unas de Cal y Otras de Arena*, y en menor grado en *Sin el Pan y sin el Queso* (ver Tabla 25). Este crecimiento en la extracción de esta roca deberá estar respaldado por la inversión en actividades de exploración y desarrollo de reservas, especialmente en los escenarios *Los Años Maravillosos* y *Unas de Cal y Otras de Arena*.

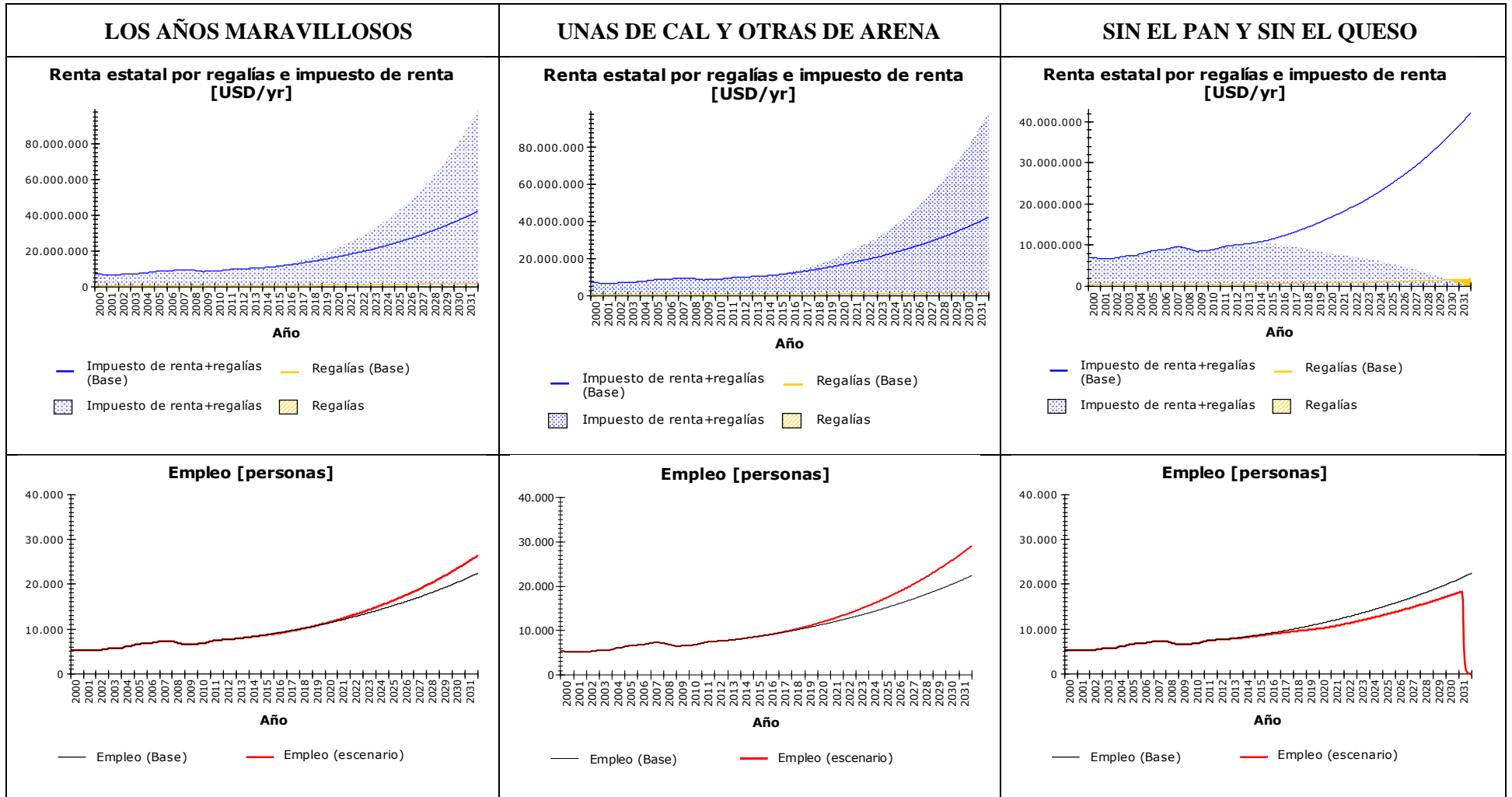
Esta gran similitud entre los tres escenarios y el escenario Base se observa también en el comportamiento de otras variables como el índice de necesidades básicas insatisfechas y el conflicto social, y la contaminación por emisiones de material particulado y su percepción por parte de las comunidades.

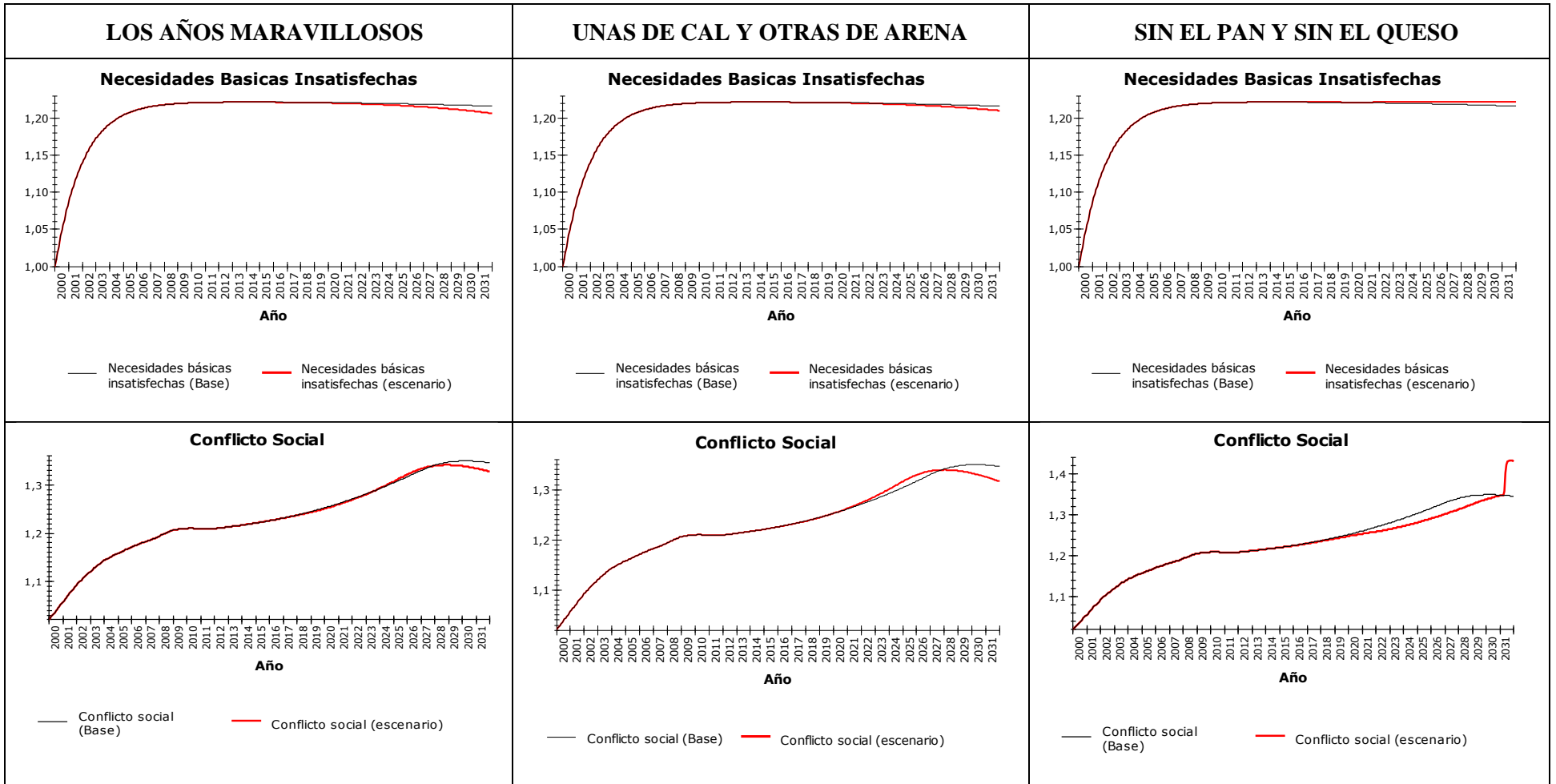
En general, la demanda de materiales para la construcción y sus respectivos insumos, jalonará el comportamiento de la extracción de caliza en las próximas dos décadas.

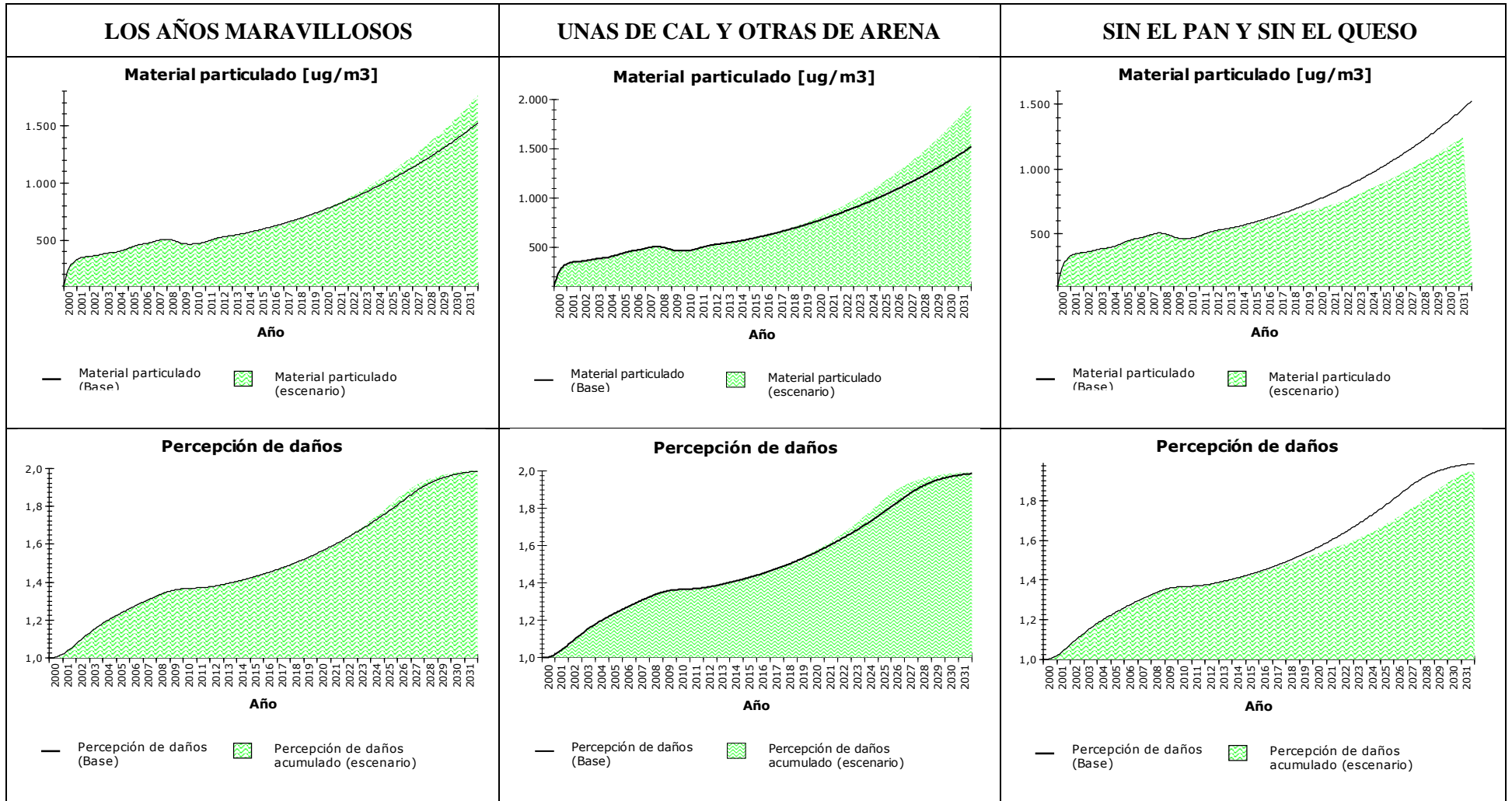
Tabla 25 – Resultados de escenarios para caliza.











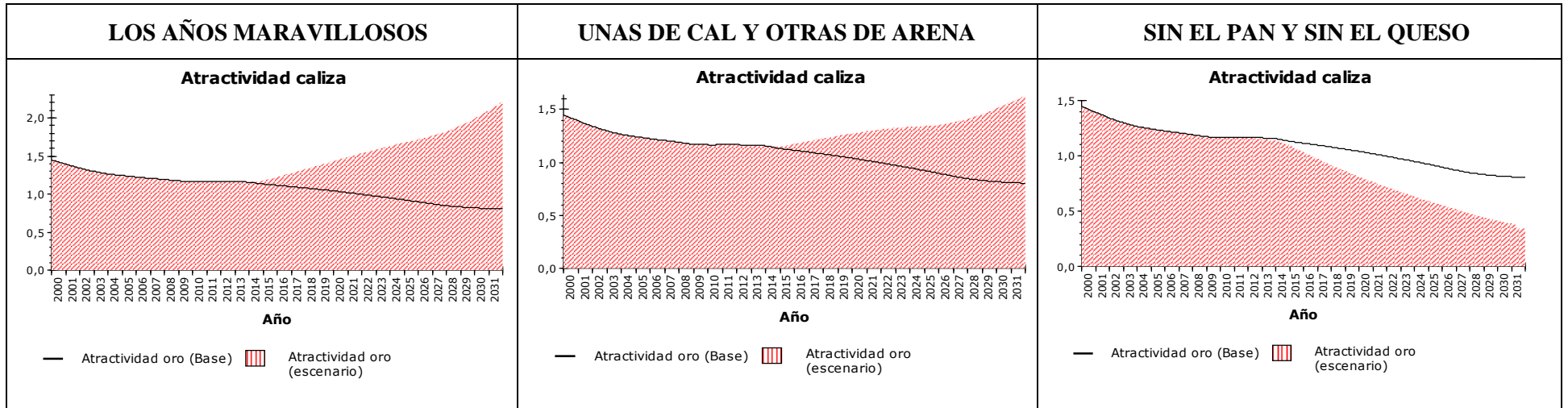


Tabla 26 – Resultados del modelo para cada escenario.
 $\Delta\%$ - Porcentaje de cambio respecto al escenario base

Variable	Unid.	Escenario					
		Los años maravillosos	$\Delta\%$	Unas de cal y otras de arena	$\Delta\%$	Sin el pan y sin el queso	$\Delta\%$
Producción acumulada - Caliza	Mton	830.54	21%	755.42	10%	583.31	-15%
Producción acumulada – Carbón metalúrgico	Mton	2,479.05	8%	2,386.32	4%	1,842.45	-20%
Producción acumulada – Carbón térmico	Mton	175.04	13%	165.75	7%	140.60	-9%
Producción acumulada - Oro	Moz	74.41	41%	56.01	6%	47.24	-10%
renta minera estatal acumulada - Caliza	MUSD	988.64	88%	817.31	56%	232.18	-56%
renta minera estatal acumulada - Carbón metalúrgico	MUSD	56,133.44	43%	50,470.63	28%	17,489.98	-56%
renta minera estatal acumulada - Carbón térmico	MUSD	6,703.15	45%	6,092.92	31%	3,514.06	-24%
renta minera estatal acumulada - Oro	MUSD	14,758.64	125%	8,691.07	33%	4,704.44	-28%
Inversión local acumulada - Caliza	MUSD	166.11	21%	151.08	10%	116.66	-15%
Inversión local acumulada - Carbón	MUSD	46,729.82	31%	42,860.18	20%	20,561.66	-42%
Inversión local acumulada - Oro	MUSD	11,062.83	79%	7,539.41	22%	4,702.81	-24%
Vertimientos acumulados de cianuro - Oro	Mug/m3	522.47	155%	259.97	27%	171.05	-17%
Vertimientos acumulados de mercurio - Oro	Mug/m3	3,381.79	155%	1,682.70	27%	1,200.16	-10%
Emisiones acumuladas de material particulado - Caliza	Mug/m3	642.09	8%	656.93	11%	217.46	-63%
Emisiones acumuladas de material particulado -Carbón	Mug/m3	2,120.27	39%	1,962.87	29%	388.53	-74%
Empleo máximo generado – Carbón	Empleos	20,143.40	10%	20,358.66	12%	17,224.33	-6%
Empleo mínimo generado - Carbón	Empleos	8,590.93	0%	8,590.93	0%	7,031.19	-18%
Empleo máximo generado - Oro	Empleos	99,649.19	35%	73,925.01	0%	73,925.01	0%
Empleo mínimo generado - Oro	Empleos	35,000.00	0%	35,000.00	0%	30,018.53	-14%
Empleo máximo generado – Caliza	Empleos	31,765.93	42%	29,130.40	30%	18,408.02	-18%
Empleo mínimo generado - Caliza	Empleos	5,153.76	0%	5,153.76	0%	6.53	-100%

8. Estrategias para el sector minero

El propósito del modelo es evaluar el comportamiento de variables como producción, reservas, renta minera estatal, conflicto social, atractividad del mineral, entre otras, bajo diferentes escenarios. Esto se hace con el propósito de evaluar estrategias para impulsar el sector minero. Las estrategias a ser evaluadas son tomadas del estudio anterior Escenarios Mineros para Colombia 2032. Se han seleccionado aquellas que son posibles de evaluarlas con el modelo desarrollado. En la Tabla 25 se muestra el conjunto de estrategias propuestas para el sector minero a ser evaluadas.

Tabla 27 – Estrategias propuestas para el sector minero

Estrategia	Variables involucradas	Comportamiento de la variable
Mejoras en la institucionalidad	Capacidad de fiscalización	Aumento a una tasa constante en el tiempo
	Estabilidad jurídica	Comportamiento “alto”, presentado en la sección de escenarios de simulación.
Competitividad	Infraestructura	Garantizar la trayectoria alta en todos los escenarios
	Seguridad	Garantizar la trayectoria alta en todos los escenarios
Mejoras en conocimiento geológico	Tasa de aumento de reservas probables	Aumento en las tasas debido a mayor disponibilidad de la información
Incentivos tributarios	Tasa de impuestos Porcentaje de regalías	Disminución en el porcentaje de impuestos y porcentaje de regalías para aumentar la atractividad del país, hasta alcanzar el valor más bajo de la región
Mejora en efectividad de planes de formalización y legalización	Tasa de formalización y legalización	Aumento constante en la tasa de formalización y legalización.
Inserción de encadenamientos productivos en el sector	Demanda interna de carbón térmico	Aumento en la demanda por la entrada de nuevas centrales térmicas en el país.
	Demanda interna de carbón metalúrgico	Aumento en la demanda por entrada de industria siderúrgica en el país
	Demanda interna de oro	Creación de demanda interna de oro para industria joyera

Cada una de estas estrategias es simulada en cada escenario, de manera que se estudie el efecto marginal de la aplicación de la estrategia comparada con la no existencia de la misma. Finalmente se construye la posibilidad de la aplicación de un conjunto de estrategias en simultáneo, para analizar el efecto integrado de la aplicación de una serie de estrategias. A continuación se describen las estrategias a ser incluidas en

el modelo para analizar sus impactos en el sector minero (sobre variables incluidas en el modelo) en cada uno de los escenarios.

8.1 Mejoras en institucionalidad

Una de las estrategias formuladas es una mejor estabilidad jurídica, para esto se propone que esta consista en asegurar el comportamiento “alto” de la variable estabilidad jurídica, presentado en la sección *Escenarios* del presente documento. Por otro lado, en las estrategias de aumento de la capacidad de fiscalización no se consideró el carbón térmico, ya que actualmente su capacidad de fiscalización se encuentra en 100%. Sin embargo, el modelo permite evaluar una disminución en la capacidad de fiscalización de este mineral. Para los otros minerales -carbón metalúrgico, oro, y caliza-, se consideran dos estrategias. La primera, es un aumento del 20% en la capacidad de fiscalización, pasando del 60% en 2014 al 80% en 2032 (Línea roja Figura 41). La segunda es un aumento del 40%, pasando de una capacidad de fiscalización del 60% al 100% en 18 años (Línea azul Figura 41).

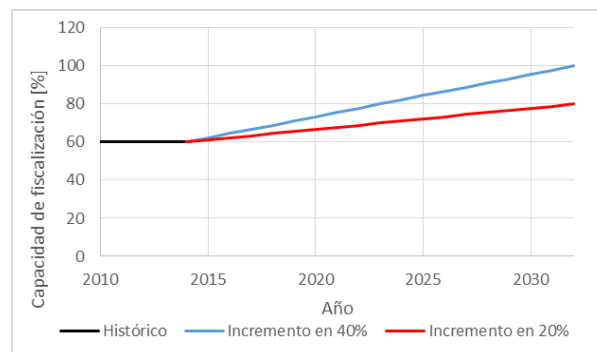


Figura 41. Estrategias de mejora en la capacidad de fiscalización

En la Tabla 28 se presenta una comparación entre los resultados de cada escenario y los resultados de la estrategia descrita aplicada en el mismo escenario. En general, se observa que esta estrategia no afecta la producción, ya que esta se encuentra directamente ligada al precio; sin embargo, si se observaron mejoras en variables como en la renta minera estatal, inversión local, conflicto social y atractividad. En particular, se observa aumentos superiores al 30% en la renta minera e inversiones locales superiores al 15% para el escenario “los años maravillosos”. Similar comportamiento se observa para el resto de escenarios.

Tabla 28 – Efecto de mejoras en institucionalidad sobre los escenarios.
 Δ s – Porcentaje de cambio respecto al escenario sin estrategia

Variable	Und.	Sin estrategia	Fiscalización 80%	Δ s	Fiscalización 100%	Δ s
Escenario “los años maravillosos”						
Producción titulada acumulada - Cbn term	Mton	830,54	830,54	0%	830,54	0%
Renta minera estatal acumulada - Caliza	Musd	988,64	988,64	0%	1.394,51	41%
Renta minera estatal acumulada - Cbn met	Musd	6.703,15	6.703,15	0%	8.696,63	30%
Renta minera estatal acumulada - Oro	Musd	14.758,64	14.758,64	0%	19.191,49	30%
Inversión local acumulada - Caliza	Musd	166,11	166,11	0%	166,11	0%
Inversión local acumulada - Cbn	Musd	46.729,82	46.729,82	0%	47.801,95	2%
Inversión local acumulada - Oro	Musd	11.062,83	11.062,83	0%	13.540,70	22%
Material particulado - Caliza	ug/m3	2.120,27	2.120,27	0%	2.120,27	0%
Max empleo caliza	personas	31.765,93	31.765,93	0%	31.765,93	0%
Min empleo caliza	personas	5.153,76	5.153,76	0%	5.153,76	0%
Reservas probables - Cbn term	Mton	6,07	6,07	0%	5,49	-10%
Reservas probadas - Cbn term	Mton	3.541,73	3.541,73	0%	3.541,17	0%
Reservas en desarrollo - Cbn term	Mton	894,19	894,19	0%	895,33	0%
Reservas probables - Oro	Moz	0,05	0,05	0%	0,05	0%
Reservas probadas - Oro	Moz	4,49	4,49	0%	4,40	-2%
Reservas en desarrollo - Oro	Moz	34,01	34,01	0%	34,11	0%
Reservas probables - Caliza	Mton	0,31	0,31	0%	0,31	0%
Reservas probadas - Caliza	Mton	1.423,24	1.423,24	0%	1.422,67	0%
Reservas en desarrollo - Caliza	Mton	499,21	499,21	0%	499,78	0%
Escenario “unas de cal y otras de arena”						
Producción titulada acumulada - Cbn term	Mton	755,42	755,42	0%	755,42	0%
Renta minera estatal acumulada - Caliza	Musd	817,31	981,20	20%	1.137,14	39%
Renta minera estatal acumulada - Cbn met	Musd	6.092,92	6.960,42	14%	7.817,47	28%
Renta minera estatal acumulada - Oro	Musd	8.691,07	9.562,25	10%	10.380,22	19%
Inversión local acumulada - Caliza	Musd	151,08	151,08	0%	151,08	0%
Inversión local acumulada - Cbn	Musd	42.860,18	43.331,65	1%	43.798,90	2%
Inversión local acumulada - Oro	Musd	7.539,41	8.110,44	8%	8.648,29	15%
Material particulado - Caliza	ug/m3	1.962,87	1.962,87	0%	1.962,87	0%

Variable	Und.	Sin estrategia	Fiscalización 80%	Δs	Fiscalización 100%	Δs
Max empleo caliza	personas	29.130,40	29.130,40	0%	29.130,40	0%
Min empleo caliza	personas	5.153,76	5.153,76	0%	5.153,76	0%
Reservas probables - Cbn term	Mton	358,36	312,82	-13%	311,42	-13%
Reservas probadas - Cbn term	Mton	3.429,17	3.456,62	1%	3.457,43	1%
Reservas en desarrollo - Cbn term	Mton	747,19	765,28	2%	765,88	3%
Reservas probables - Oro	Moz	38,34	37,68	-2%	37,61	-2%
Reservas probadas - Oro	Moz	5,84	6,34	9%	6,40	9%
Reservas en desarrollo - Oro	Moz	12,77	12,94	1%	12,95	1%
Reservas probables - Caliza	Mton	193,01	136,69	-29%	136,10	-29%
Reservas probadas - Caliza	Mton	1.474,78	1.512,56	3%	1.512,95	3%
Reservas en desarrollo - Caliza	Mton	330,08	348,63	6%	348,83	6%
Variable	Und.	Sin estrategia	Fiscalización 80%	Δs	Fiscalización 100%	Δs
Escenario “sin el pan y sin el queso”						
Producción titulada acumulada - Cbn term	Mton	583,31	589,98	1%	589,98	1%
Renta minera estatal acumulada - Caliza	Musd	232,18	246,80	6%	261,17	12%
Renta minera estatal acumulada - Cbn met	Musd	3.514,06	3.798,86	8%	4.076,80	16%
Renta minera estatal acumulada - Oro	Musd	4.704,44	4.826,54	3%	4.942,26	5%
Inversión local acumulada - Caliza	Musd	116,66	118,00	1%	118,00	1%
Inversión local acumulada - Cbn	Musd	20.561,66	20.748,51	1%	20.931,80	2%
Inversión local acumulada - Oro	Musd	4.702,81	4.808,43	2%	4.908,48	4%
Material particulado - Caliza	ug/m3	388,53	583,70	50%	583,86	50%
Max empleo caliza	personas	18.408,02	18.664,91	1%	18.664,91	1%
Min empleo caliza	personas	6,53	67,56	934%	67,66	936%
Reservas probables - Cbn term	Mton	2.269,77	2.259,76	0%	2.259,72	0%
Reservas probadas - Cbn term	Mton	2.757,59	2.759,46	0%	2.759,46	0%
Reservas en desarrollo - Cbn term	Mton	51,22	59,37	16%	59,40	16%
Reservas probables - Oro	Moz	57,82	57,73	0%	57,73	0%
Reservas probadas - Oro	Moz	6,24	6,29	1%	6,29	1%
Reservas en desarrollo - Oro	Moz	2,85	2,89	1%	2,89	1%
Reservas probables - Caliza	Mton	1.284,07	1.279,65	0%	1.279,64	0%
Reservas probadas - Caliza	Mton	885,92	883,67	0%	883,67	0%
Reservas en desarrollo - Caliza	Mton	0,00	0,01	934%	0,01	936%

En el escenario “los años maravillosos” se observa un aumento en la renta estatal minera, y por tanto crece la inversión local. Sin embargo, la atraktividad de cada mineral no cambia con respecto al mismo escenario sin estrategia, pues dichas atraktividades está dominadas por los altos precios (Figura 42).

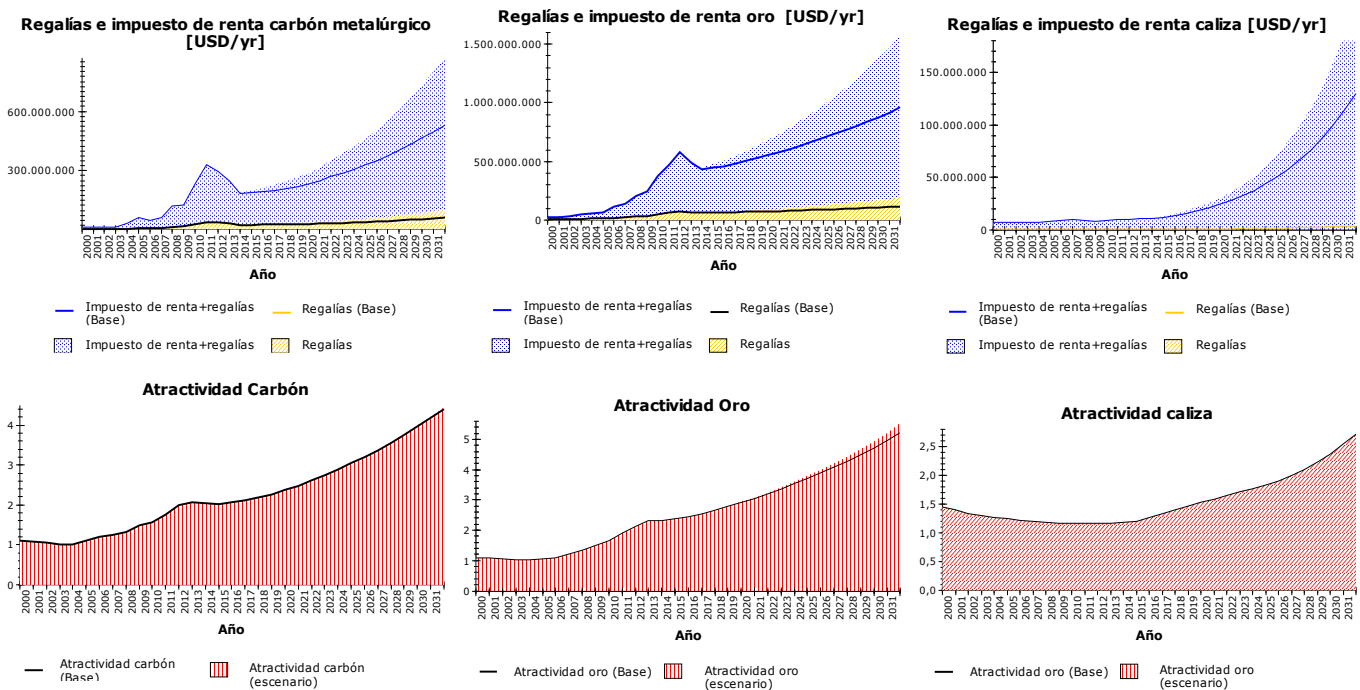


Figura 42 – Resultados de aumentar la fiscalización hasta el 100% para el escenario “los años maravillosos”.

Los resultados del escenario “unas de cal y otras de arena” se muestran en la Figura 43. En este escenario se alcanzan mayores valores de renta minera estatal, inversión social y atraktividad, ya que el escenario presenta precios mayores. En este escenario es visible un aumento de la atraktividad debido a las mejoras en la estabilidad jurídica.

En el escenario “sin el pan y sin el queso”, los precios bajos dominan el sistema y el aumento en el recaudo por fiscalización no es suficiente para disminuir el conflicto social. Igualmente, aunque la estrategia aumenta la atraktividad de cada mineral, ésta es dominada por los precios bajos, por lo que la estrategia no tiene efectos observables en el sistema (Figura 44).

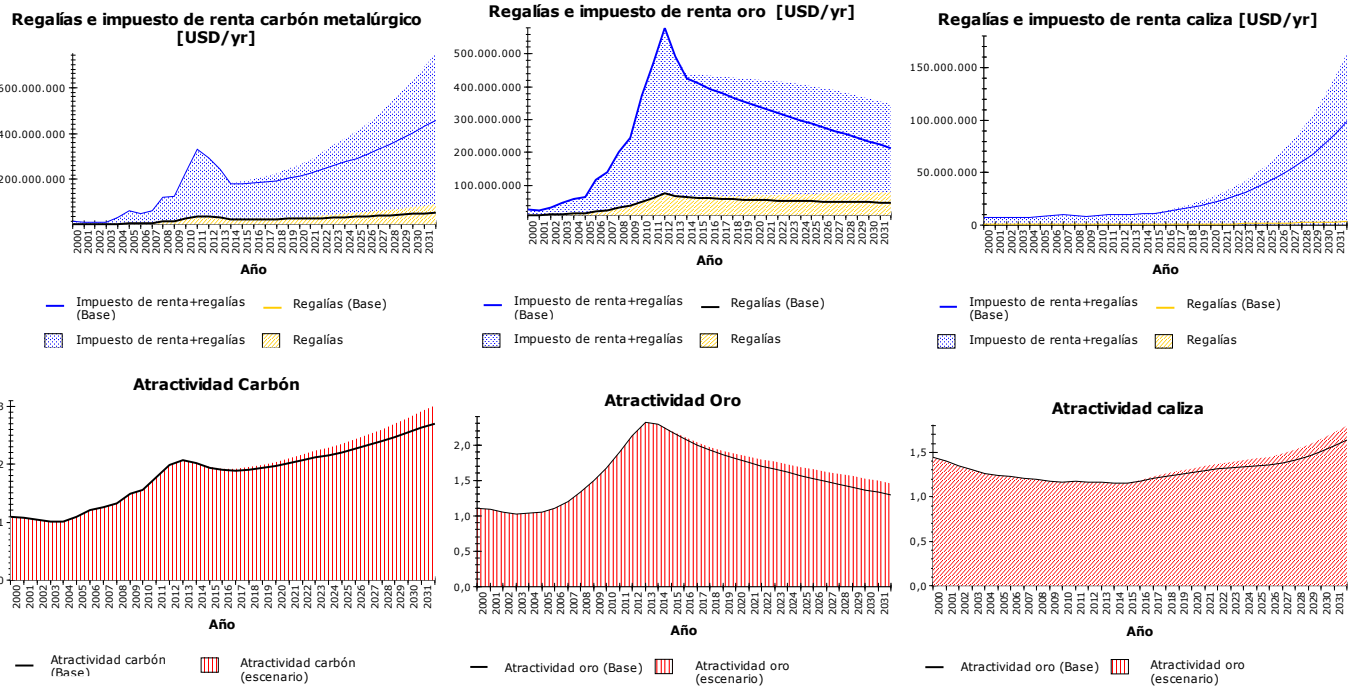


Figura 43 – Resultados de aumentar la fiscalización hasta el 100% para el escenario “unas de cal y otras de arena”.

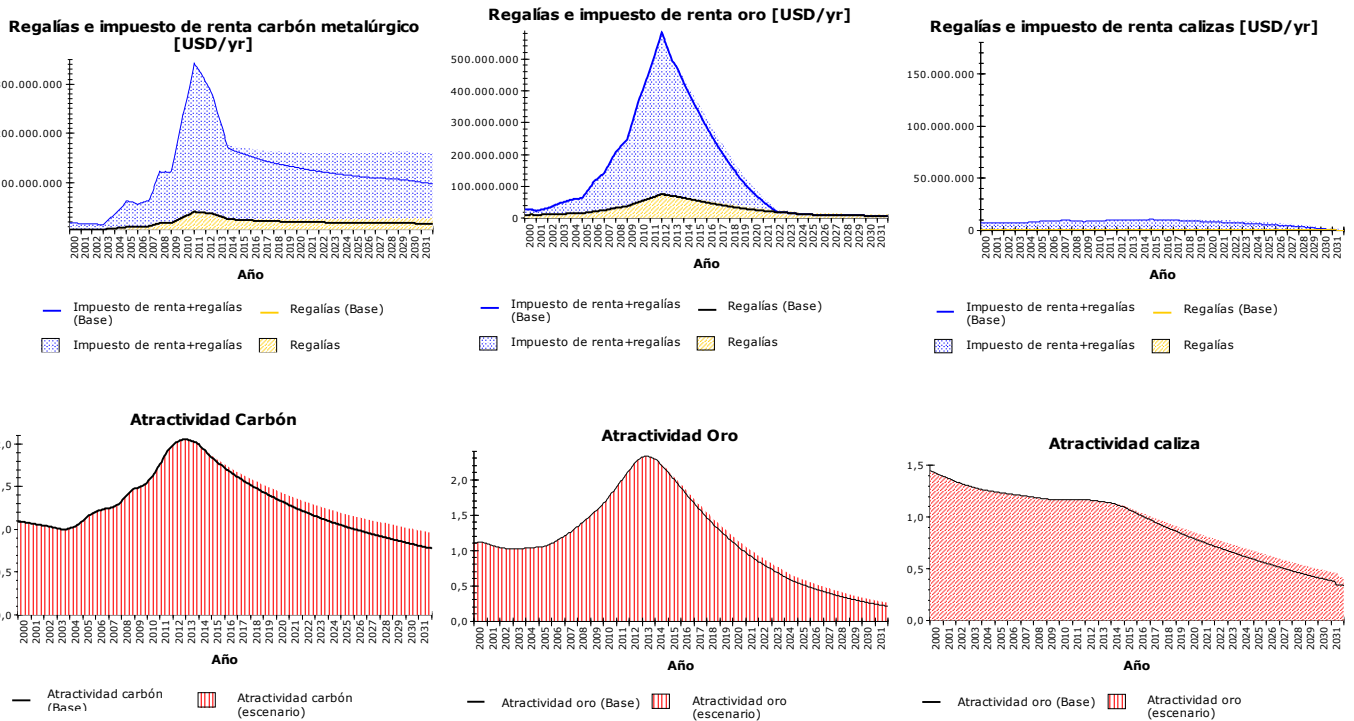


Figura 44 – Resultados de aumentar la fiscalización hasta el 100% para el escenario “sin el pan y sin el queso”.

8.2 Competitividad

La estrategia de competitividad permite evaluar el efecto de garantizar una alta competitividad del país para mejorar la atractividad del mismo. Para esto, se garantizó la trayectoria alta de las variables “seguridad” e “infraestructura” descrita en la sección *Escenarios* del presente documento. Estas variables tienen un efecto en la atractividad, que a su vez modifica las tasas de descubrimiento y desarrollo de los minerales. Sin embargo, para el carbón metalúrgico no se observa desarrollo ni descubrimiento de reservas en ningún escenario, pues las reservas en desarrollo actuales son suficientes para suplir la producción hasta 2032.

En la Tabla 29 se presenta la comparación de los escenarios “sin el pan y sin el queso”, y “unas de cal otras de arena”, con y sin estrategia de competitividad. El escenario “los años maravillosos” se excluyó del análisis, ya que dicho escenario ya incluye las trayectorias altas de las variables de competitividad.

Tabla 29 – Efecto de mejoras en competitividad sobre los escenarios.
 Δ s – Porcentaje de cambio respecto al escenario sin estrategia

Variable	Und.	Unas de cal y otras de arena			Sin el pan y sin el queso		
		Sin estrategia	Con estrategia	Δ s	Sin estrategia	Con estrategia	Δ s
Producción titulada acumulada - Cbn term	Mton	755,42	755,42	0%	583,31	601,99	3%
Inversión local acumulada - Caliza	Musd	151,08	151,08	0%	116,66	120,40	3%
Material particulado - Caliza	ug/m3	1.962,87	1.962,87	0%	388,53	1.189,58	206%
Max empleo caliza	personas	29.130,40	29.130,40	0%	18.408,02	19.012,30	3%
Reservas probables - Cbn term	Mton	358,36	255,60	-29%	2.269,77	2.242,23	-1%
Reservas probadas - Cbn term	Mton	3.429,17	3.491,98	2%	2.757,59	2.762,93	0%
Reservas en desarrollo - Cbn term	Mton	747,19	787,14	5%	51,22	73,42	43%
Reservas probables - Oro	Moz	38,34	36,92	-4%	57,82	57,59	0%
Reservas probadas - Oro	Moz	5,84	6,93	19%	6,24	6,37	2%
Reservas en desarrollo - Oro	Moz	12,77	13,11	3%	2,85	2,95	3%
Reservas probables - Caliza	Mton	193,01	57,64	-70%	1.284,07	1.270,66	-1%
Reservas probadas - Caliza	Mton	1.474,78	1.566,92	6%	885,92	879,75	-1%

En el escenario “unas de cal y otras de arena” se observa que las atractividades aumentan con la implementación de la estrategia, las tasas de desarrollo aumentan ligeramente -haciendo que las reservas en desarrollo sean mayores-, mientras que las tasas de descubrimiento se mantienen constantes, y las reservas probables disminuyen. Sin embargo, el aumento en la atractividad y las reservas en desarrollo no logran realizar cambios en la producción.

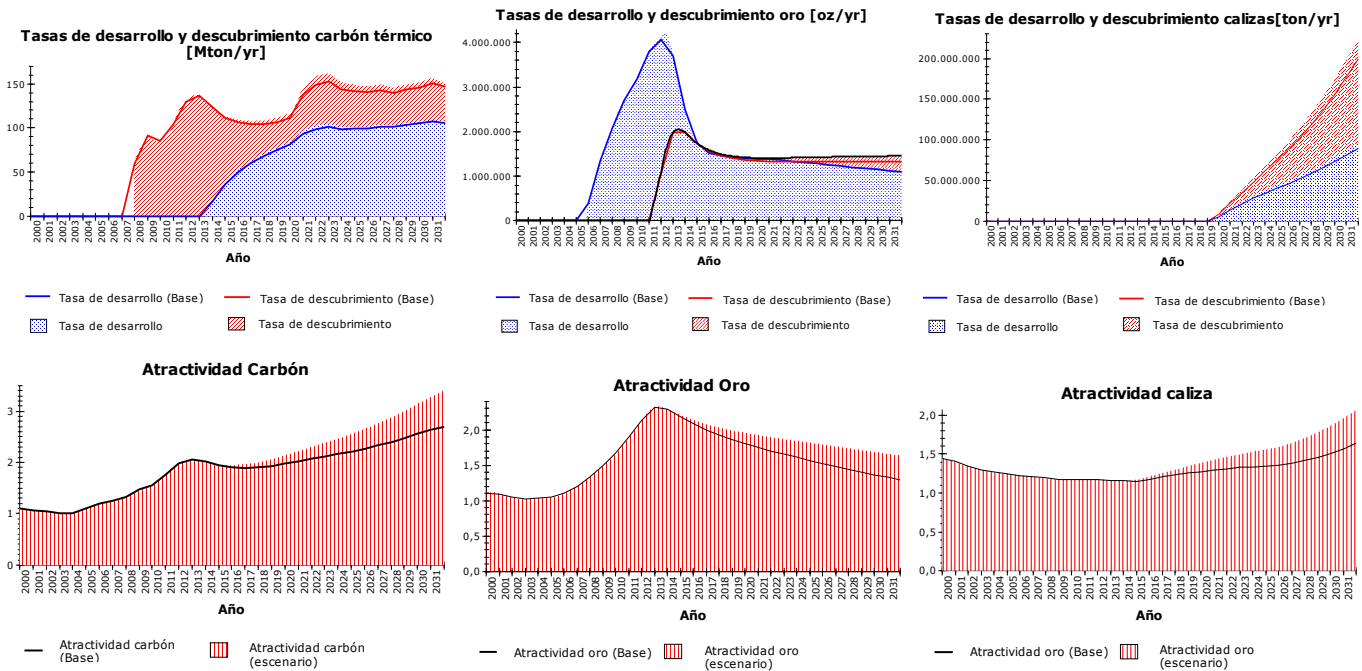


Figura 45 – Resultados de mejoras en competitividad para el escenario “unas de cal y otras de arena”.

Para el escenario “sin el pan y sin el queso” se observan comportamientos similares a los del escenario “unas de cal otras de arena” pero con porcentajes de variación diferentes. Ligeros aumentos en las tasas de desarrollo y descubrimiento para oro y carbón metalúrgico, y considerables aumentos en estas tasas para la caliza. Sin embargo no se logra incentivar la producción, a pesar del efecto positivo de la estrategia en las atractividades de los tres minerales (Figura 46).

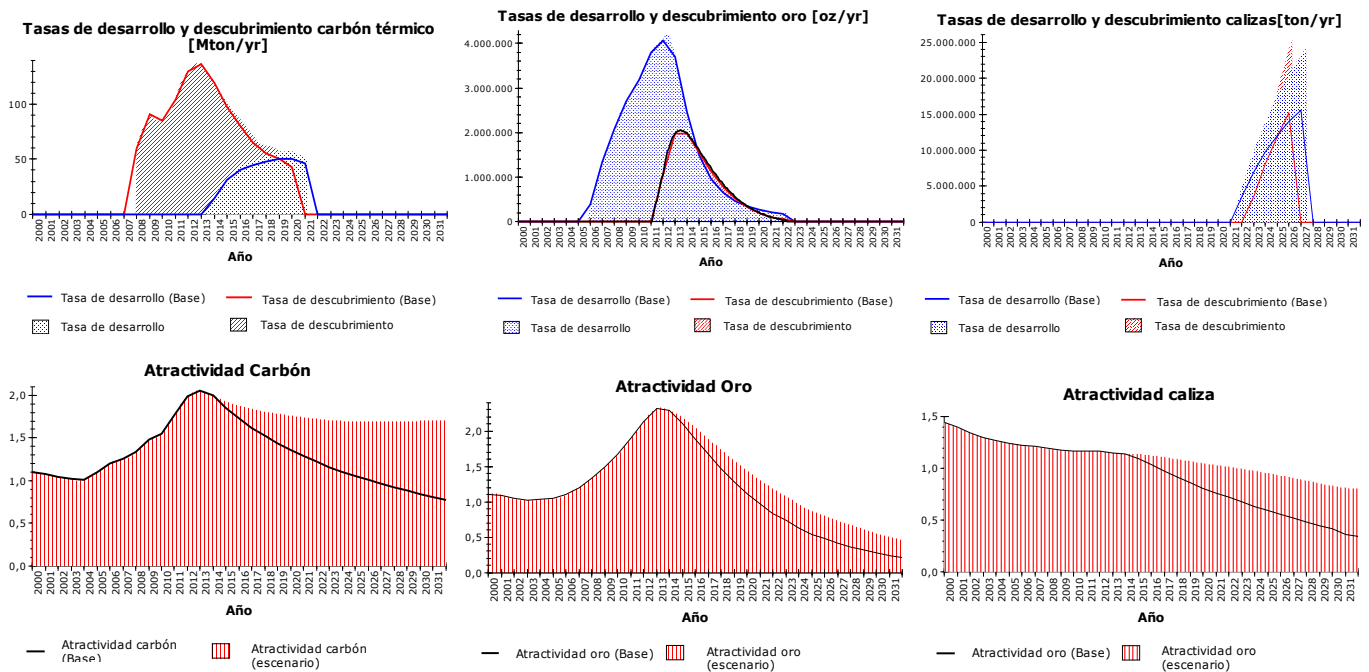


Figura 46 – Resultados de mejoras en competitividad para el escenario “sin el pan y sin el queso”.

8.3 Mejoras en conocimiento geológico

Esta estrategia se implementa dentro del modelo a través de los flujos de “nuevas reservas probables”. Si el conocimiento geológico mejora, se espera un aumento en dicho flujo. Para esta estrategia se plantearon 3 opciones, como aumentos constantes del flujo hasta alcanzar un incremento de 20, 50 y 100% desde el 2014 hasta el 2032 para el carbón térmico (Figura 47), carbón metalúrgico (Figura 48), oro (Figura 49), y caliza (Figura 50).

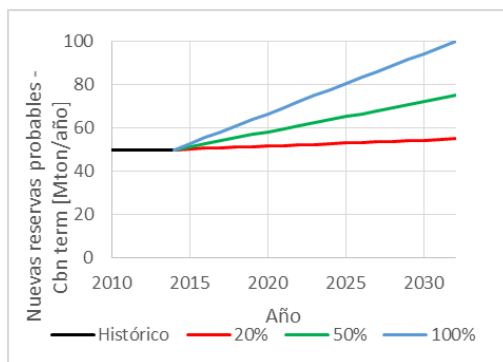


Figura 47. Estrategias de mejoras en el conocimiento geológico del carbón térmico

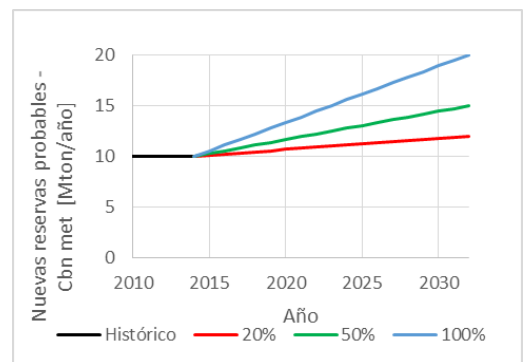


Figura 48. Estrategias de mejoras en el conocimiento geológico del carbón metalúrgico

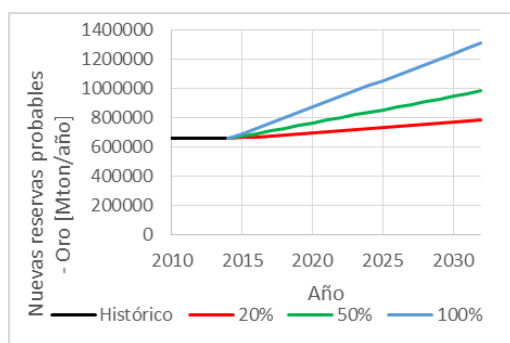


Figura 49. Estrategias de mejoras en el conocimiento geológico del oro

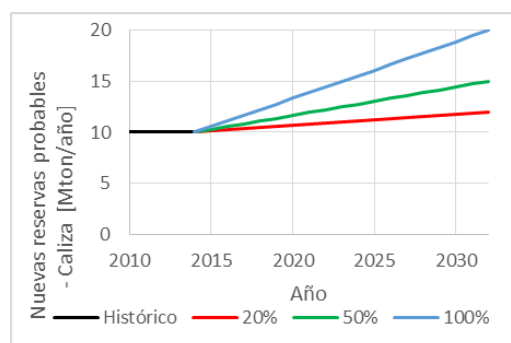


Figura 50. Estrategias de mejoras en el conocimiento geológico de las caliza

Las tres opciones de mejoras en el conocimiento geológico se implementaron en cada escenario, como se muestra en la Tabla 30. El principal efecto de esta estrategia dentro del sistema es el aumento de reservas. Sin embargo, estos aumentos no se ven reflejados en la producción ya que esta última está dominada por el precio y no se presenta escasez de reserva a largo plazo.

Tabla 30 – Efecto de mejoras en conocimiento geológico sobre los escenarios.
 Δs – Porcentaje de cambio respecto al escenario sin estrategia

Variable	Und.	Sin estrategia	20%	Δs	50%	Δs	100%	Δs
Los años maravillosos								
Reservas probables - Cbn term	Mton	6,07	13,50	122%	5,53	-9%	180,08	2867%
Reservas probables - Cbn met	Mton	641,80	661,06	3%	689,43	7%	736,80	15%
Reservas probables - Oro	Moz	0,05	0,07	21%	0,08	50%	0,11	100%
Reservas probadas - Oro	Moz	4,49	5,77	28%	7,59	69%	10,67	138%
Reservas probables - Caliza	Mton	0,31	0,37	20%	0,47	51%	0,63	103%
Unas de cal y otras de arena								
Reservas probables - Cbn term	Mton	358,36	454,60	27%	596,36	66%	833,08	132%
Reservas probables - Cbn met	Mton	641,80	661,06	3%	689,43	7%	736,80	15%
Reservas probables - Oro	Moz	38,34	39,63	3%	41,47	8%	44,57	16%
Reservas probadas - Oro	Moz	5,84	5,84	0%	5,84	0%	5,84	0%
Reservas probables - Caliza	Mton	193,01	211,84	10%	239,65	24%	286,40	48%
Sin el pan y sin el queso								
Reservas probables - Cbn term	Mton	2.269,77	2.364,34	4%	2.506,19	10%	2.744,77	21%
Reservas probables - Cbn met	Mton	641,80	661,06	3%	689,43	7%	736,80	15%

Variable	Und.	Sin estrategia	20%	Δs	50%	Δs	100%	Δs
Reservas probables - Oro	Moz	57,82	59,11	2%	60,94	5%	64,05	11%
Reservas probadas - Oro	Moz	6,24	6,24	0%	6,24	0%	6,24	0%
Reservas probables - Caliza	Mton	1.284,07	1.303,69	2%	1.331,36	4%	1.379,07	7%

En la Figura 51 se presenta la estrategia de mejoras en el conocimiento geológico para el caso del escenario “los años maravillosos”. Para el caso de caliza el conocimiento geológico afecta todos los niveles de reservas, para el oro afecta las reservas probables y probadas, mientras que en el caso del carbón solo se ven afectadas las reservas probables. Esto es debido principalmente al abastecimiento de los minerales, en el caso de carbón las reservas actuales permiten soportar el incremento planteado por el escenario sin mayor inversión, mientras que la tasa incrementada de producción en caliza y oro exige un mayor desarrollo y descubrimiento.

Las simulaciones para el escenario de “unas de cal y otras de arena” se muestran en la Figura 52, en la que se puede observar que el efecto de la estrategia disminuye, debido a que el flujo de reservas jalonado por la producción es menor que el planteado en el escenario anterior. En este punto las reservas de probadas en el caso del oro, y las reservas probadas y en desarrollo para el caso de caliza, no presentan ahora una variación apreciable.

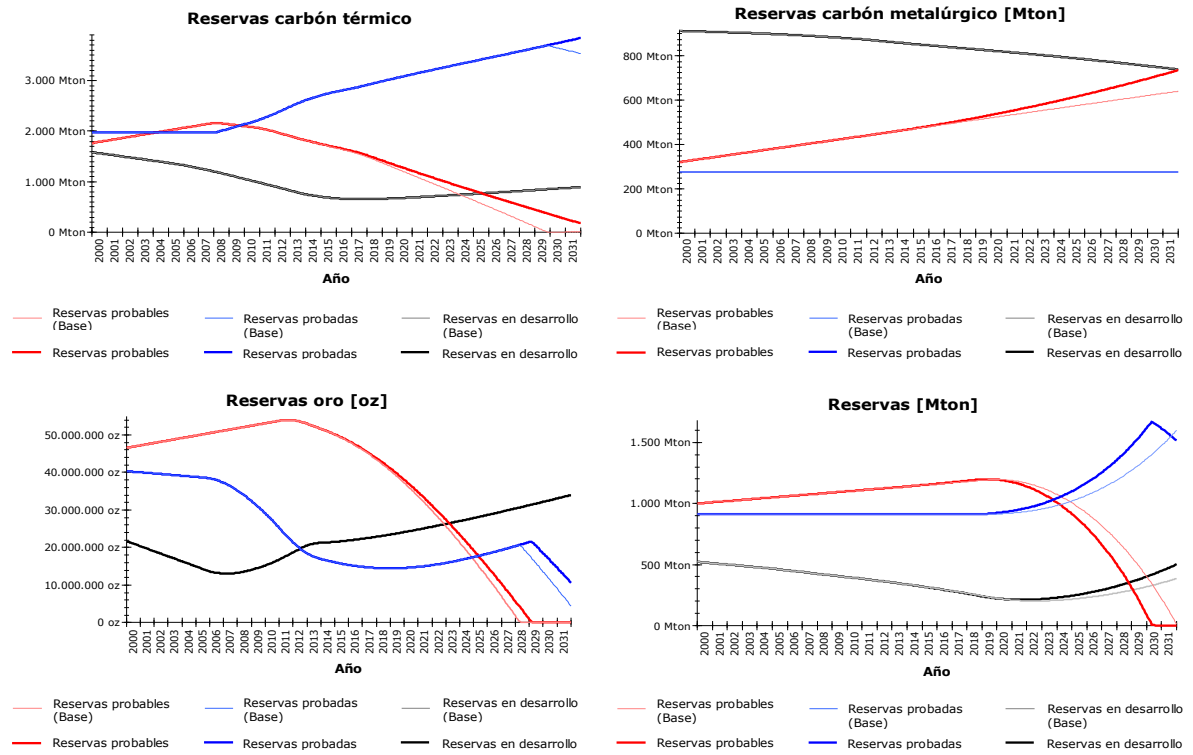


Figura 51 – Resultados de mejoras en conocimiento geológico para reservas probables en el escenario “los años maravillosos”.

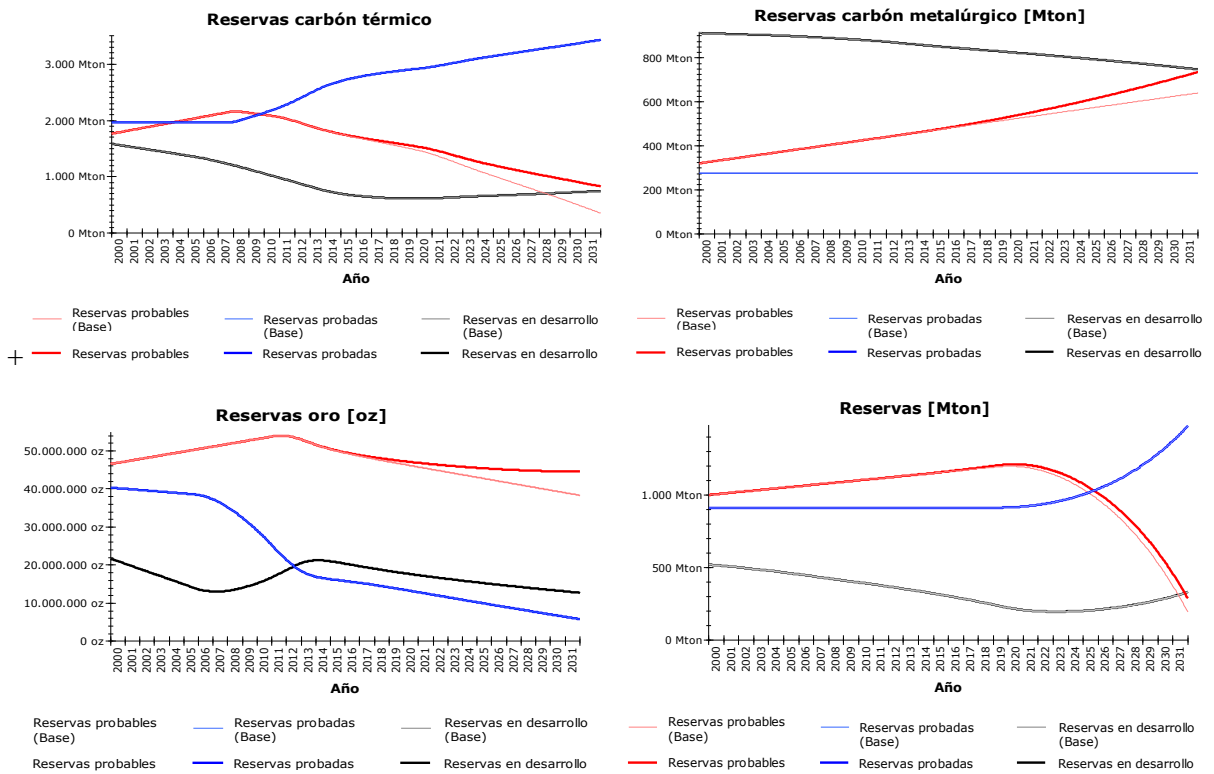


Figura 52 – Resultados de mejoras en conocimiento geológico para reservas probables en el escenario “unas de cal y otras de arena”.

Para el último escenario (“sin el pan ni el queso”), aplica de nuevo el análisis del escenario “unas de sal y unas de arena”. El aumento en las reservas probables que se observa es el aumento inercial, pero no ser presenta flujo a otros tipos de reservas dado la baja producción.

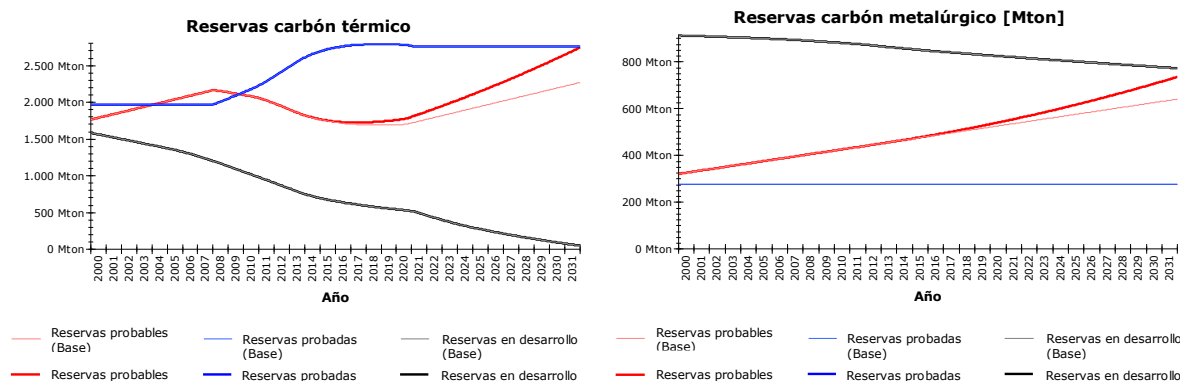
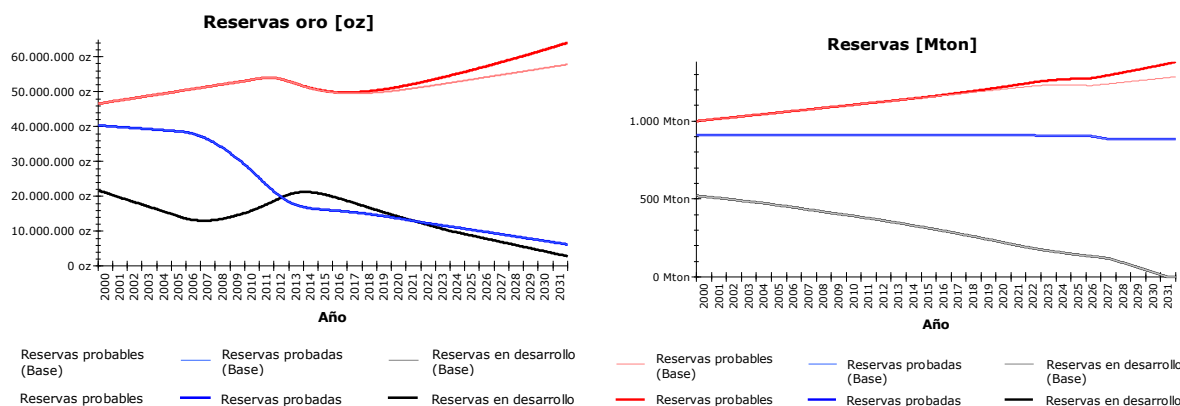


Figura 53 – Resultados de mejoras en conocimiento geológico para reservas probables en el escenario “sin el pan ni el queso”.



Continúa **Figura 53** – Resultados de mejoras en conocimiento geológico para reservas probables en el escenario “sin el pan ni el queso”.

8.4 Incentivos tributarios

Los incentivos tributarios son una estrategia conocida en diferentes sectores que busca la reducción de impuestos para el fomento y desarrollo de la industria. Esta estrategia afecta a los parámetros “tasa de

impuestos”, y “porcentaje de regalías”, con el fin de evaluar el efecto de estas en la atraktividad del país. Con ese propósito se consideraron dos posibilidades: (1) disminuir el impuesto a la renta, (2) disminuir el porcentaje de regalías. El impuesto de renta se disminuyó a 20%, un 3% más que en el caso de Chile –el país minero con el impuesto de renta más bajo de la región- (Tabla 31). Para las regalías estas se disminuyeron de 5% a 3% para el carbón metalúrgico, y el oro, el valor máximo que tiene este impuesto a la extracción, en Argentina –el único país con un régimen similar al de Colombia- (Tabla 31); para el carbón las regalías pasaron de 8% a 5%. Los resultados de estas variaciones se muestran en la Tabla 32 y Tabla 33.

Tabla 31- Impuestos al sector minero

País	Impuesto a la renta	Regalías/Impuesto a la extracción
Argentina	35%	Mayoría de los minerales 0-3% del valor a boca de mina (varía según jurisdicciones)
Brasil	34% ¹	0.2% - 3.0% en el valor de venta menos algunas deducciones ²
Chile	17%	Impuesto a la minería de 0% a 5% del margen operativo
Colombia	33%	1%-12% del valor a boca de mina
México	30% ³	Ninguno
Perú	30%	1% - 3% de las ventas brutas

Fuente: Adaptado de Instituto Peruano de Economía, 2011

En la Figura 54, Figura 55 y Figura 56 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes escenarios cuando se disminuyen las regalías. En el escenario de “los años maravillosos” (Figura 54) se observa un aumento en la atraktividad del carbón debido a que aumenta la rentabilidad del negocio, esto lleva a una mayor actividad minera (producción, desarrollo y descubrimiento), lo que se traduce en aumento del empleo. Este aumento de empleo no afecta el conflicto social, pues el aumento en la producción lleva a aumentos en la contaminación. Para el oro, aunque la atraktividad aumenta, el precio sigue gobernando toda la actividad, por lo que no se observan cambios en las demás variables. Para la caliza aumenta la

¹ Incluye 15% del IR, 9% por impuesto de contribución social (no deducible contra el IR) y 10% de recargo sobre el ingreso superior a 240.000 reales

² Las tasas impositivas varían dependiendo del tipo de mineral. Las empresas mineras también pagan al dueño de la tierra el 50% de las regalías. En Brasil, las regalías se determinan por una oficina del Ministerio de Energía y Minas, sin embargo deben ser aprobadas por la Cámara Baja, el Congreso y finalmente firmado por el presidente

³ Del 2010 al 2012, luego una disminución del 1% cada uno de los siguientes 2 años hasta un 28% en 2014

atractividad, desarrollo y descubrimiento de reservas, sin embargo la producción no aumenta debido a que está ligada a la demanda interna de materiales de construcción.

Para el caso de “unas de cal y otras de arena” (Figura 55), se observa que el efecto de las regalías es menor, debido a que las regalías dependen directamente de la producción, la cual tiene un crecimiento moderado debido a los cambios en los precios. Se observa que en esta magnitud las regalías no tienen un efecto notable en la atractividad, siendo aproximadamente nulas para el oro y la caliza.

De igual forma al caso de “unas de cal y otras de arena” (Figura 56), en el escenario de “sin el pan y sin el queso” se observa que el efecto de la estrategia de regalías no es importante debido a los bajos niveles de producción.

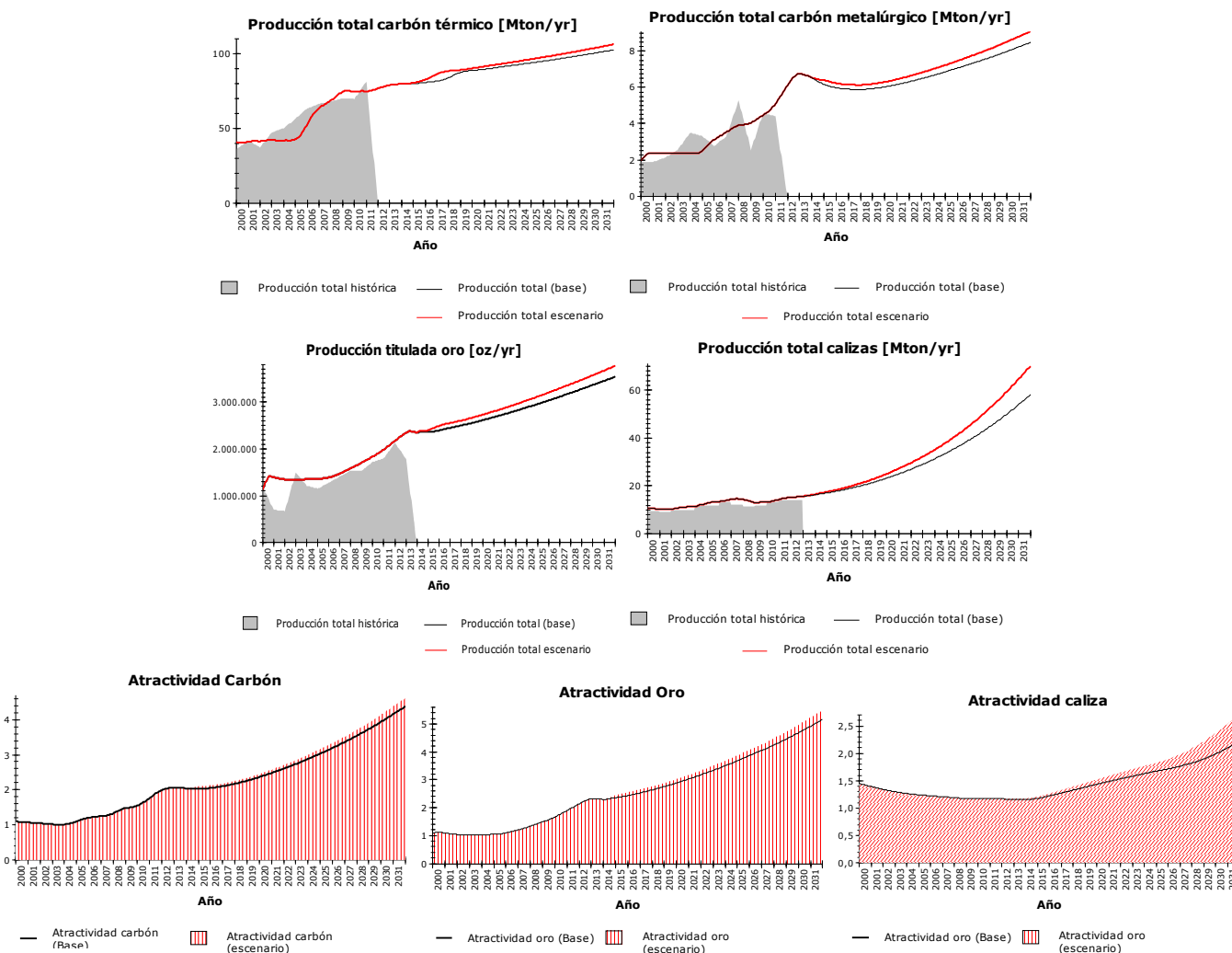


Figura 54 – Resultados de disminución en regalías para el escenario “los años maravillosos”.

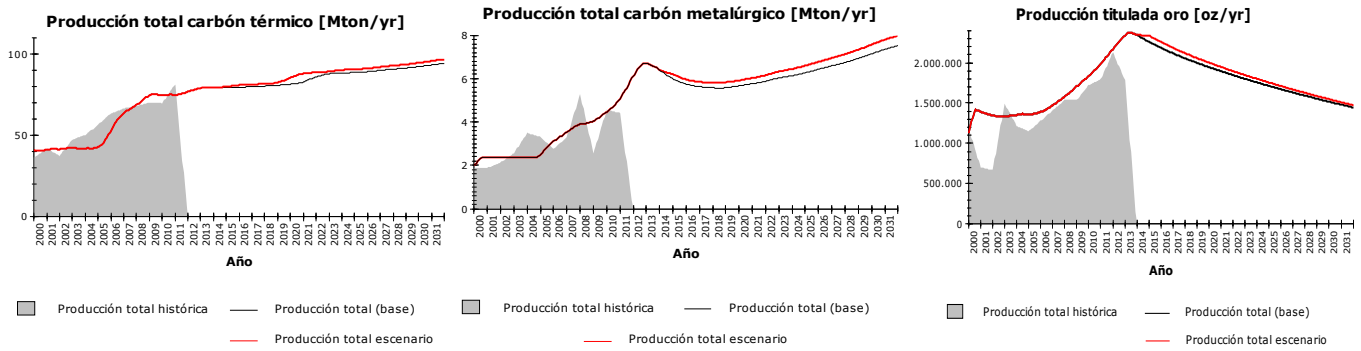


Figura 55 – Resultados de disminución en regalías para el escenario “unas de cal y otras de arena”.

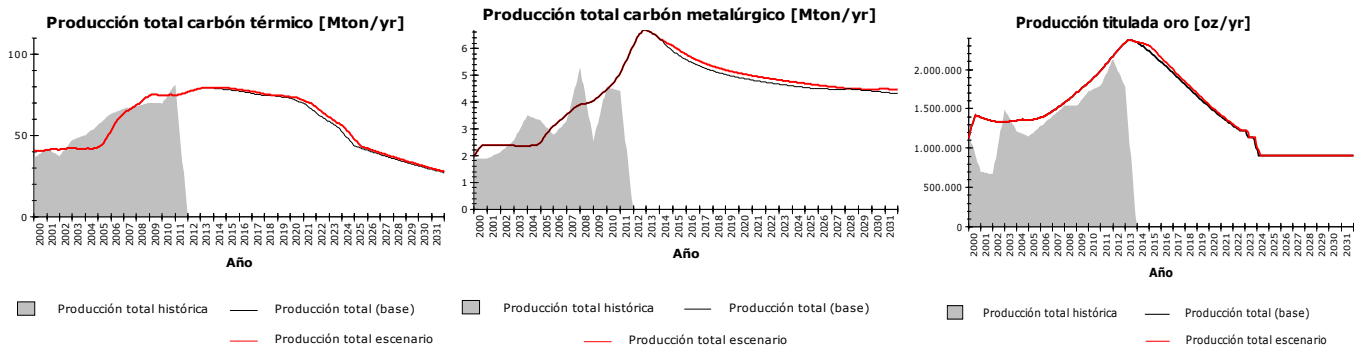


Figura 56 – Resultados de disminución en regalías para el escenario “sin el pan y sin el queso”.

Tabla 32 – Efecto de regalías sobre escenarios
 Δ s – Porcentaje de cambio respecto al escenario sin estrategia

Variable	Und.	Los años maravillosos			Unas de cal y otras de arena			Sin el pan y sin el queso		
		Sin estrategia	Con estrategia	Δ s	Sin estrategia	Con estrategia	Δ s	Sin estrategia	Con estrategia	Δ s
Producción titulada acumulada - Cbn term	Mton	2.479,05	2.527,72	2%	2.386,32	2.425,43	2%	1.842,45	1.869,10	1%
Producción titulada acumulada - Cbn met	Mton	175,04	181,51	4%	165,75	171,46	3%	140,60	143,21	2%
Producción titulada acumulada - Oro	Moz	74,41	77,12	4%	56,01	56,97	2%	47,24	47,68	1%
Renta minera estatal acumulada - Cbn term	Musd	56.133,44	54.640,03	-3%	50.470,63	48.878,30	-3%	17.489,98	16.619,33	-5%
Renta minera estatal acumulada - Cbn met	Musd	6.703,15	6.758,06	1%	6.092,92	6.106,67	0%	3.514,06	3.453,69	-2%
Renta minera estatal acumulada - Oro	Musd	14.758,64	14.863,18	1%	8.691,07	8.527,11	-2%	4.704,44	4.599,83	-2%
Inversión local acumulada - Cbn	Musd	46.729,82	45.668,99	-2%	42.860,18	41.748,83	-3%	20.561,66	19.820,07	-4%
Inversión local acumulada - Oro	Musd	11.062,83	11.102,43	0%	7.539,41	7.427,12	-1%	4.702,81	4.618,33	-2%
Mercurio acumulado	ug/m3	522,47	555,58	6%	259,97	265,61	2%	171,05	171,14	0%
Cianuro	mgr/m3	3.381,79	3.596,14	6%	1.682,70	1.719,20	2%	1.200,16	1.200,82	0%
Material particulado - Cbn	ug/m3	642,09	665,24	4%	656,93	673,98	3%	217,46	222,62	2%
Max empleo cbn	personas	20.143,40	20.934,53	4%	20.358,66	20.949,37	3%	17.224,33	17.357,20	1%
Min empleo cbn	personas	8.590,93	8.590,93	0%	8.590,93	8.590,93	0%	7.031,19	7.207,08	3%
Max empleo oro	personas	99.649,19	106.361,68	7%	73.925,01	75.638,80	2%	73.925,01	75.638,80	2%
Reservas probables - Cbn term	Mton	6,07	22,71	274%	358,36	192,79	-46%	2.269,77	2.209,70	-3%
Reservas probadas - Cbn term	Mton	3.541,73	3.436,79	-3%	3.429,17	3.527,93	3%	2.757,59	2.774,27	1%
Reservas en desarrollo - Cbn term	Mton	894,19	933,83	4%	747,19	774,89	4%	51,22	67,97	33%
Reservas en desarrollo - Cbn met	Mton	739,23	732,76	-1%	748,52	742,81	-1%	773,67	771,06	0%
Reservas probables - Oro	Moz	0,05	0,05	0%	38,34	36,61	-5%	57,82	56,85	-2%
Reservas probadas - Oro	Moz	4,49	0,04	-99%	5,84	6,30	8%	6,24	6,56	5%
Reservas en desarrollo - Oro	Moz	34,01	35,78	5%	12,77	13,08	2%	2,85	3,06	7%
Reservas probables - Caliza	Mton	0,31	0,31	0%	193,01	194,80	1%	1.284,07	1.284,08	0%
Porcentaje de producción no titulada sobre titulada	%	22,41	21,58	-4%	29,77	29,26	-2%	32,78	32,47	-1%

Para la estrategia de impuesto de renta, como se mencionó anteriormente, se plantean una disminución del impuesto de renta base (33%) a una tasa de impuestos del 20% a partir del año 2014. En la Figura 57, Figura 58 y Figura 59 se muestran los resultados de implementar la disminución en los impuestos en los diferentes escenarios planteados. De igual forma, la Tabla 33 muestra el resumen de los cambios cuantitativos en algunas de las variables.

De forma general se observa que las principales variables afectadas por el cambio en el impuesto de renta son: la renta, la inversión local, y las necesidades básicas insatisfechas. Una disminución se traduce en menos ingresos del estado y en menos inversión social. El efecto se percibe de una forma más notoria para el caso del carbón. Si bien la disminución en la tasa de impuesto puede aumentar la atractividad de inversión en la producción, al mostrar un negocio más rentable a través de las ganancias netas, el efecto se ve reducido debido al aumento en el conflicto social producto de la disminución en inversión social, lo que afecta negativamente la atractividad.

Como se observa en la Figura 57 del escenario “los años maravillosos”, si bien el incremento en la renta disminuye la renta y aumenta los conflictos sociales, la tendencia a mejorar en estas variables prevalece, es decir, las variables presentan una mejoría pero menos rápida que en el escenario sin la estrategia.

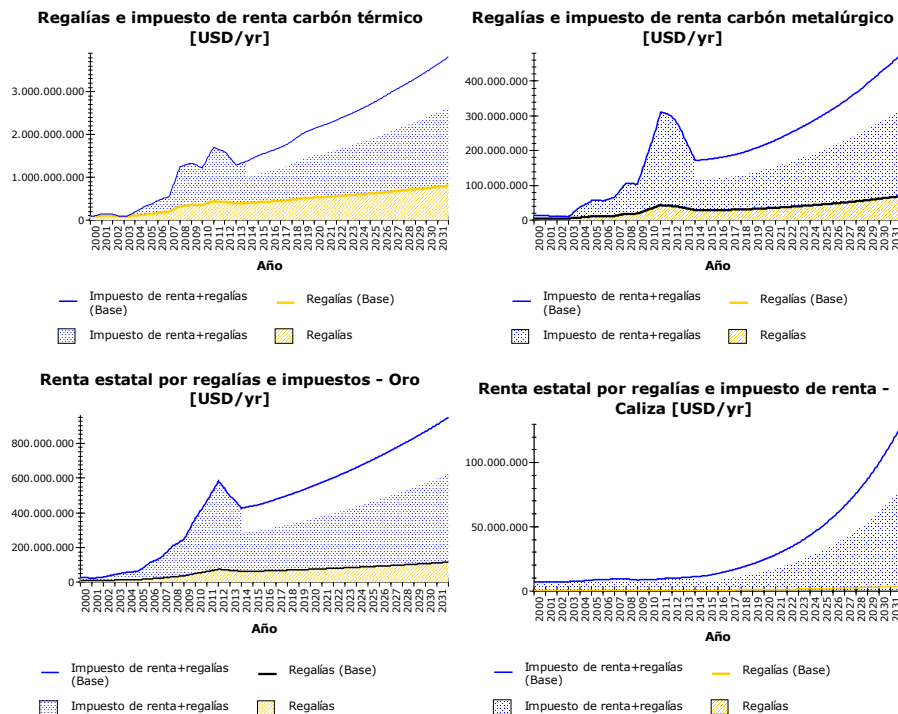
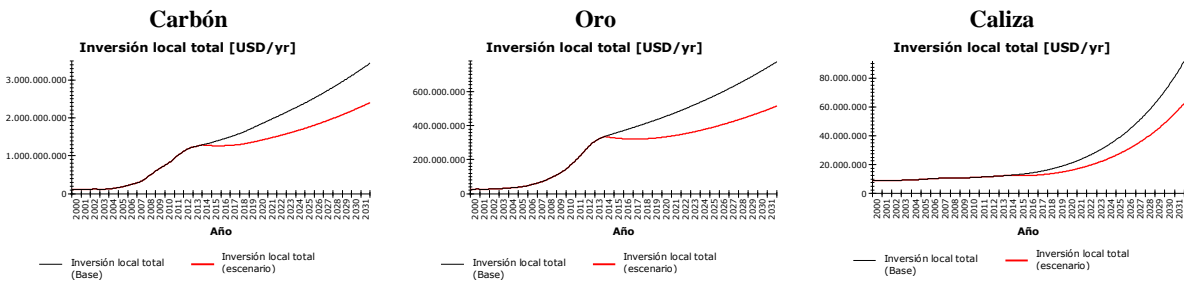


Figura 57 – Resultados de disminuir el impuesto de renta en el escenario “los años maravillosos”



Continúa **Figura 57** - Resultados de disminuir el impuesto de renta en el escenario “los años maravillosos”

Como se observa en la Figura 58 los resultados del escenario “unas de cal y otras de arena”, son similares a los “años maravillosos”, las variables siguen la tendencia a mejorar con un menor ritmo en el caso del carbón y la caliza, mientras que el oro las variables desmejoran y la estrategia acelera su efecto.

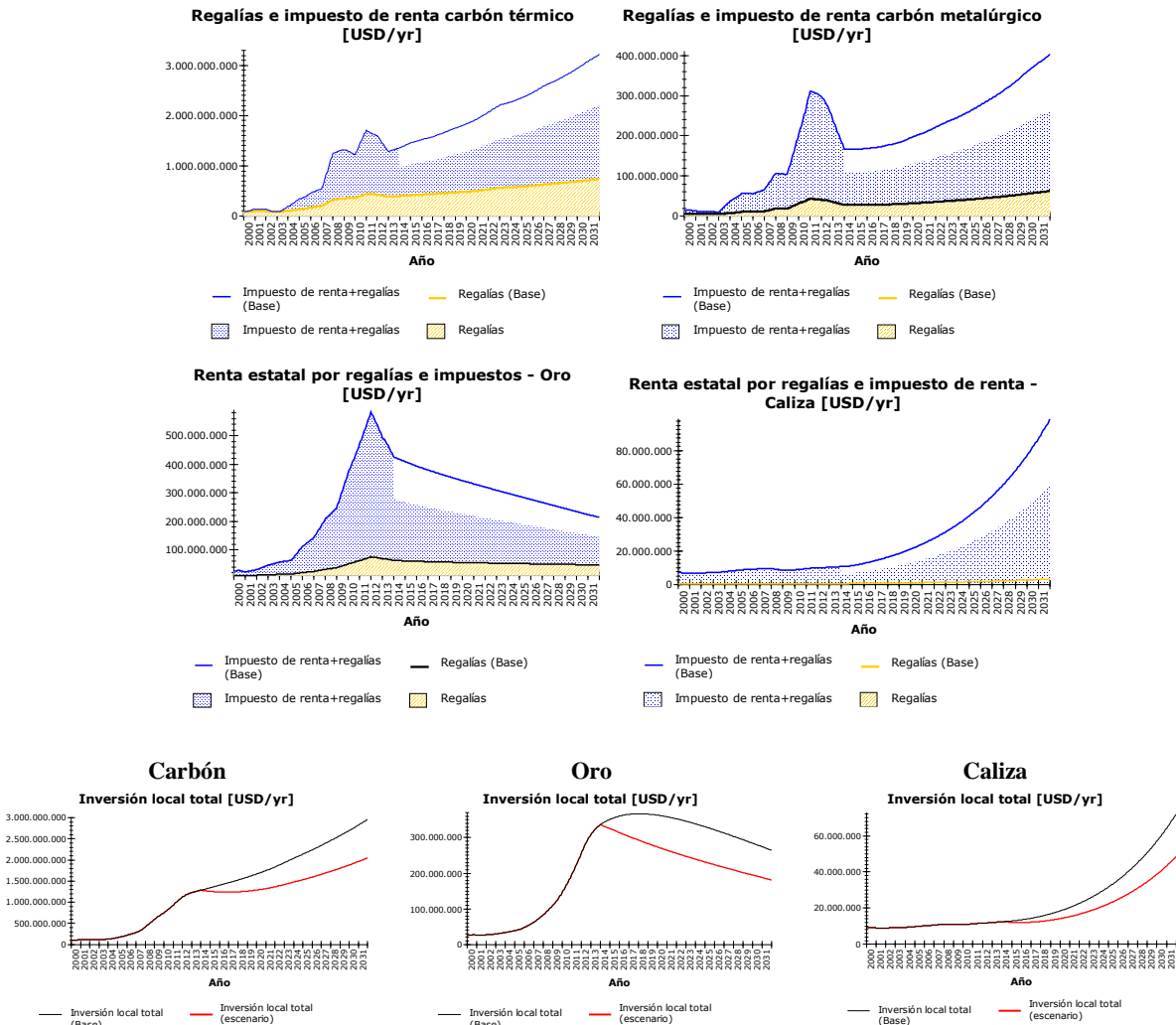


Figura 58 – Resultados de disminuir el impuesto de renta en el escenario “unas de cal y otras de arena”

En el caso de “sin el pan y sin el queso” (Figura 59), se observa que es el escenario en que tiene menos efecto la estrategia, las tendencias se conservan con un pequeño aumento, esto se debe a que de por si los ingresos en escenarios son pequeños y la variación es porcentual.

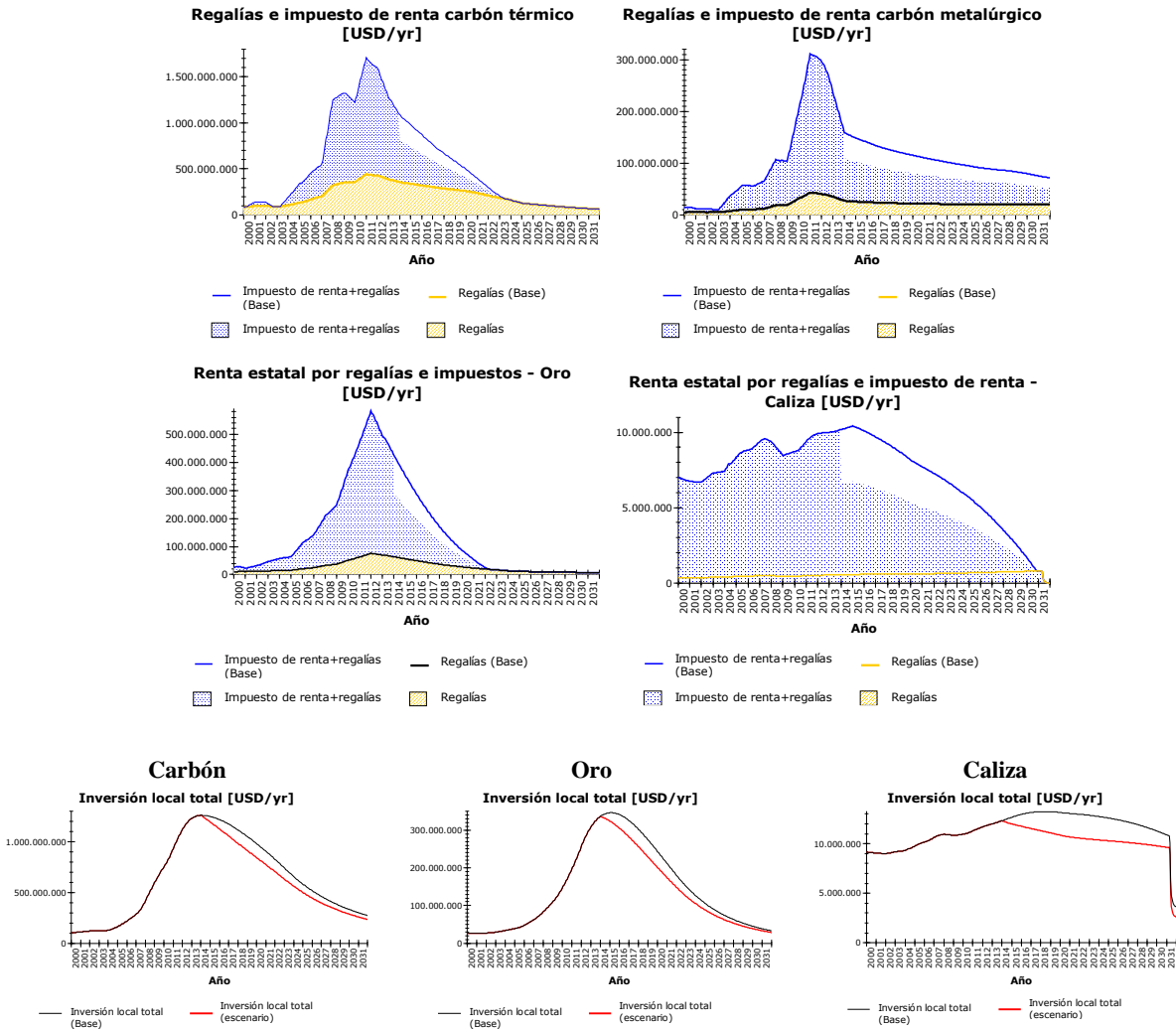


Figura 59 – Resultados de disminuir el impuesto de renta en el escenario “sin el pan y sin el queso”

Tabla 33 – Efecto de impuesto de renta sobre escenarios.
 Δ s – Porcentaje de cambio respecto al escenario sin estrategia

Variable	Und	Sin estrategia	20%	Δ s
Los años maravillosos				
Renta minera estatal acumulada - Caliza	Musd	988,64	660,98	-33%
Renta minera estatal acumulada - Cbn term	Musd	56.133,44	42.633,29	-24%
Renta minera estatal acumulada - Cbn met	Musd	6.703,15	5.016,46	-25%
Renta minera estatal acumulada - Oro	Musd	14.758,64	10.799,77	-27%
Inversión local acumulada - Cbn	Mton	46.729,82	36.751,98	-21%
Inversión local acumulada - Oro	Mton	11.062,83	8.408,92	-24%
Reservas en desarrollo - Cbn term	Mton	894,19	885,55	-1%
Unas de cal y otras de arena				
Renta minera estatal acumulada - Caliza	Musd	817,31	555,02	-32%
Renta minera estatal acumulada - Cbn term	Musd	50.470,63	38.941,99	-23%
Renta minera estatal acumulada - Cbn met	Musd	6.092,92	3.764,84	-38%
Renta minera estatal acumulada - Oro	Musd	8.691,07	6.880,25	-21%
Inversión local acumulada - Cbn	Mton	42.860,18	33.744,72	-21%
Inversión local acumulada - Oro	Mton	7.539,41	6.128,88	-19%
Reservas en desarrollo - Cbn term	Mton	747,19	708,82	-5%
Sin el pan y sin el queso				
Renta minera estatal acumulada - Caliza	Musd	232,18	192,50	-17%
Renta minera estatal acumulada - Cbn term	Musd	17.489,98	16.242,56	-7%
Renta minera estatal acumulada - Cbn met	Musd	3.514,06	2.921,23	-17%
Renta minera estatal acumulada - Oro	Musd	4.704,44	4.232,86	-10%
Inversión local acumulada - Cbn	Mton	20.561,66	18.917,89	-8%
Inversión local acumulada - Oro	Mton	4.702,81	4.253,71	-10%
Reservas en desarrollo - Cbn term	Mton	51,22	50,19	-2%

8.5 Mejoras en planes de formalización y legalización

Para conocer cuál es el efecto de una estrategia que tenga por objetivo mejorar la efectividad de los planes de formalización y legalización se propone dos estrategias, aumentar la tasa de formalización hasta 5%, y hasta 10% como se muestra en la Figura 60.

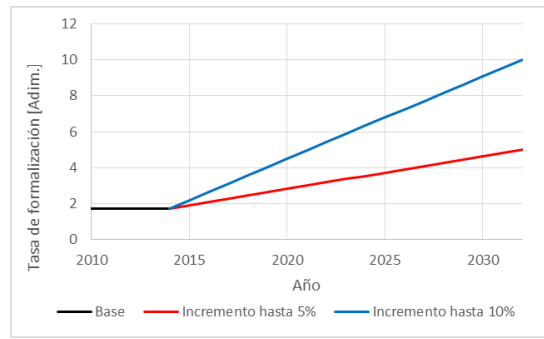


Figura 60. Estrategias en formalización y legalización

En ninguno de los casos se observaron cambios en la atractividad del oro, conflicto social y contaminación. Esto se debe a que, si bien se reduce la producción informal, las minas informales no desaparecen, si no que pasan a formar parte de la capacidad de producción formal. Es decir, siguen afectando el entorno (la diferencia en la contaminación es pequeña comparada con la producción formal). El cambio en la tasa de formalización y legalización afecta principalmente a la producción no titulada y a las reservas probadas de oro, debido a que ya no se extrae mineral de estas reservas, si no que se extrae de las reservas en desarrollo. A continuación se muestran los resultados de la estrategia con los diferentes escenarios.

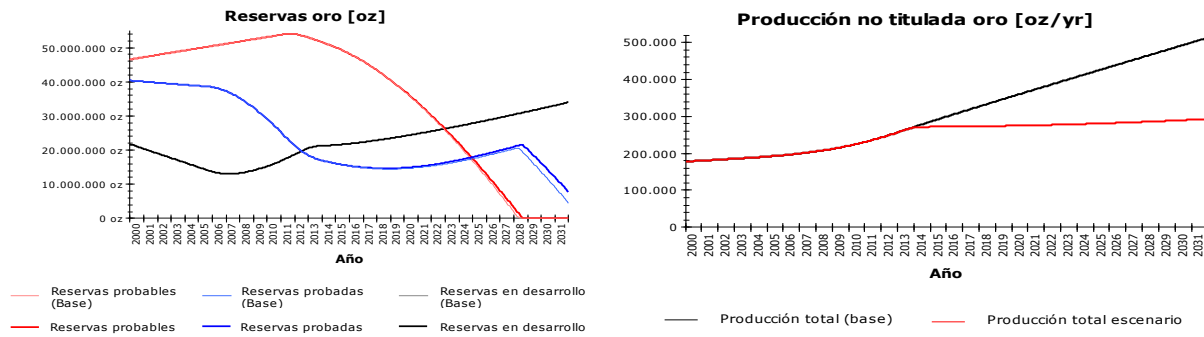


Figura 61 – Resultados de mejoras en formalización para escenario “los años maravillosos”

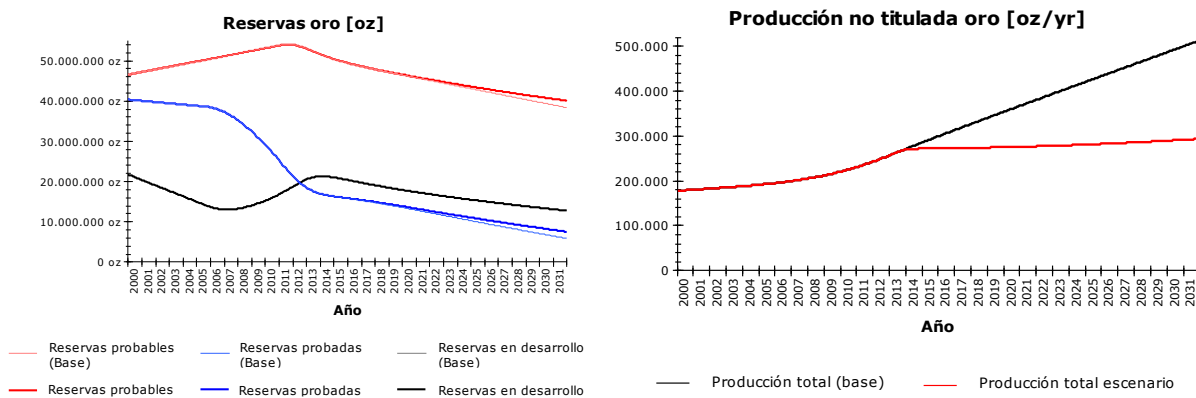


Figura 62 – Resultados de mejoras en formalización para escenario “unas de cal y otras de arena”

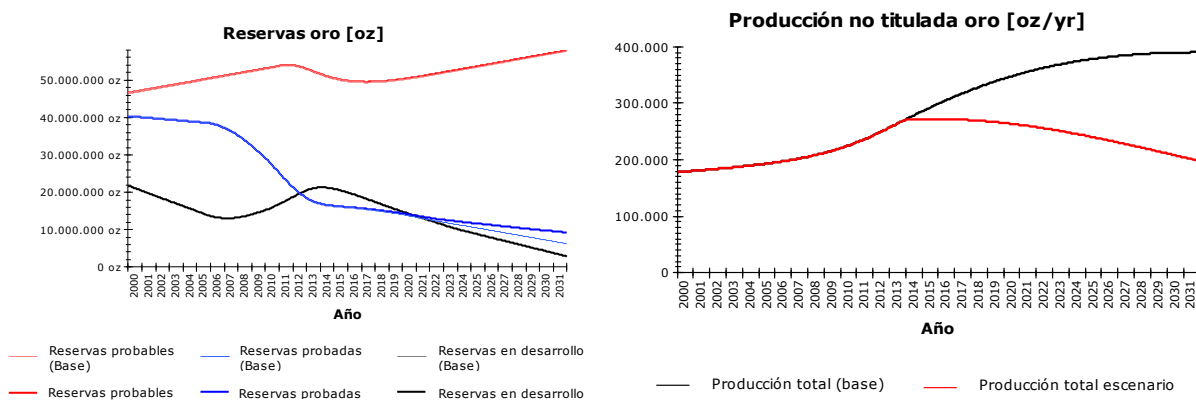


Figura 63 – Resultados de mejoras en formalización para escenario “sin el pan y sin el queso”

Si bien se observa en todos los escenarios que la producción no titulada disminuye debido a la formalización, en el caso de “los años maravillosos” y “unas de cal y otras de arena” se observa la tendencia a aumentar, mientras que en el caso de “sin el pan y sin el queso” la producción tiende a acabarse; esto se debe principalmente a que, pese los esfuerzos del gobierno, los precios altos llevan a que la atraktividad en la informalidad sea mayor y la tasa de nuevas unidades de producción mineras no tituladas sea mayor que la de formalización, caso contrario cuando los precios del oro decrecen.

Tabla 34 – Efecto de formalización sobre los escenarios
 Δ s – Porcentaje de cambio respecto al escenario sin estrategia

Variable	Und.	Sin estrategia	5%	Δ s	10%	Δ s
Los años maravillosos						
Reservas probadas - Oro	Moz	4,49	7,70	71%	9,68	116%
Reservas en desarrollo - Oro	Moz	34,01	34,01	0%	34,01	0%
Extracción no titulada acumulada - Oro	Moz	16,67	13,28	-20%	11,22	-33%
Porcentaje de producción no titulada sobre titulada	%	22,41	17,81	-21%	15,02	-33%
Unas de cal y otras de arena						
Reservas probadas - Oro	Moz	5,84	7,52	29%	8,46	45%
Reservas en desarrollo - Oro	Moz	12,77	12,77	0%	12,77	0%
Extracción no titulada acumulada - Oro	Moz	16,67	13,28	-20%	11,22	-33%
Porcentaje de producción no titulada sobre titulada	%	29,77	23,71	-20%	20,02	-33%
Sin el pan y sin el queso						
Reservas probadas - Oro	Moz	6,24	9,23	48%	11,00	76%
Reservas en desarrollo - Oro	Moz	2,85	2,88	1%	2,89	1%
Extracción no titulada acumulada - Oro	Moz	15,48	12,30	-21%	10,39	-33%
Porcentaje de producción no titulada sobre titulada	%	32,78	26,02	-21%	21,97	-33%

8.6 Encadenamientos productivos

Una de las estrategias más llamativas desde el proyecto de Escenarios Mineros para Colombia 2032 es la promoción y establecimiento de encadenamientos productivos. Los encadenamientos productivos buscan el desarrollo de industria que hagan pasar de la sola extracción del mineral a la generación de valor agregado por su transformación. Para el modelamiento se considera como una nueva demanda interna de carbón metalúrgico, térmico y oro, destinadas a suplir una nueva industria en el país, y una nueva demanda de carbón metalúrgico de exportación debido a la construcción de infraestructura para su transporte. Esta demanda interna genera un valor adicional por la transformación productiva. Cada uno de estos encadenamientos se explica a continuación.

El sistema eléctrico nacional tiene planeada la entrada de tres nuevas centrales térmicas de carbón para 2015, que suman una capacidad de 574MW (UPME, n.d.-a, n.d.-b). Estas plantas requerirán un consumo

de carbón de cerca de 690000 ton/año (con capacidad calorífica promedio de 11500 [BTU/lb]), como se muestra en la Tabla 35. Así, la demanda interna de carbón térmico tendría un comportamiento como se muestra en la Figura 64.

Tabla 35- Promedio estimado de consumo de carbón térmico de tres nuevas centrales térmicas

Año de entrada en operación	Central	Capacidad instalada (MW)	Promedio consumo (Ton/año)
2015	GECELCA 3	164	196.749,66
2015	GECELA 3.2	250	299.923,26
2015	Tasajero 2	160	191.950,89
TOTAL		574	688.623,81

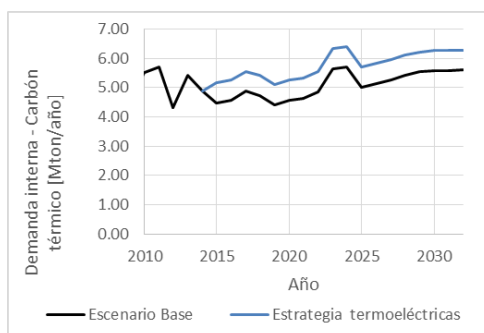


Figura 64 - Demanda interna de carbón térmico con la entrada de tres nuevas centrales térmicas

Para aumentar la demanda interna de carbón metalúrgico el país podría apostarle a dos posibles proyectos dinamizadores de esta industria: la ejecución del proyecto denominado “Ferrocarril de Carare”, y la construcción de una planta siderúrgica. Debido al “Ferrocarril de Carare” se daría un aumento de la demanda de carbón metalúrgico hasta un máximo de 40MT, sin embargo, en el presente estudio se considera un aumento hasta el 50% de dicha demanda. Este aumento se empieza a dar después de los 6 años que dura la construcción de 450km y la rehabilitación de 550km de vía férrea, (Corporación para el Desarrollo del Ferrocarril de Carare, n.d.). Para lograr esto en el modelo se hace uso de la función rampa como se muestra en la Figura 65.

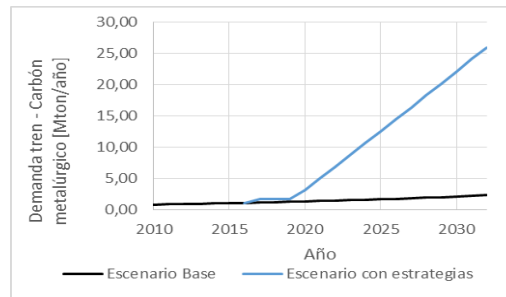


Figura 65. Demanda interna de carbón metalúrgico con la ejecución del proyecto “Ferrocarri de Carare”

Respecto a la construcción de una siderurgia, esta se estima que va a tener una producción de 500.000 toneladas de acero líquido, y tardaría aproximadamente 30 meses (Portafolio, 2013). Esto causaría que para la producción de una tonelada de arrabio -que es el primer producto en el proceso de fabricación del acero líquido- se necesiten: 2 toneladas de mena de hierro, 1 tonelada de coque, media tonelada de caliza, y 4 toneladas de oxígeno. Por lo tanto esta planta demandaría aproximadamente 500.000 toneladas de coque al año (CATAMUTUN, n.d.; Morales, Gómez, Águeda Casado, García Jiménez, & Navarro, 2011), aumentando la demanda interna como se ve en la Figura 66.

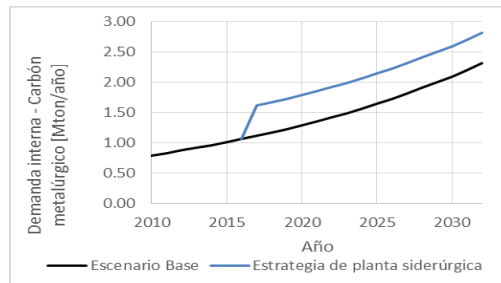


Figura 66. Demanda interna de carbón metalúrgico con la construcción de una nueva planta siderúrgica

Por otro lado, debido a que la industria joyera en el país consume alrededor del 20% de la producción aurífera nacional (Legiscomex, 2007), se propone aumentar este consumo desarrollando clústeres alrededor de las cadenas productivas de la joyería en el país como lo muestra la Figura 67.

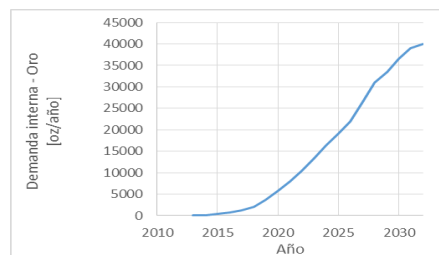


Figura 67. Demanda interna de oro por inserción de industria joyera

En la Tabla 36 se muestran los efectos de los encadenamientos sobre cada escenario, y se comparan con respecto al mismo escenario sin estrategias. En esta se observa que la producción y la renta de carbón metalúrgico aumentan más del 100% en todos los escenarios. Además, el carbón térmico también se beneficia con los encadenamientos productivos, tanto la producción como la renta minera aumentan entre 8 y 10%.

Tabla 36 – Efecto de encadenamientos productivos sobre los escenarios.
 Δs – Porcentaje de cambio respecto al escenario sin estrategia

Variable	Unid	Los años maravillosos			Unas de cal y otras de arena			Sin el pan y sin el queso		
		Sin estrategia	Con estrategia	Δs	Sin estrategia	Con estrategia	Δs	Sin estrategia	Con estrategia	Δs
Producción acumulada carbón térmico	Mton	2479	2680	8%	2386	2576	8%	1842	1961	6%
Producción acumulada carbón metalúrgico	Mton	175	486	178%	166	448	170%	141	328	133%
Producción acumulada oro	Moz	74	75	1%	56	56	1%	47	47	0%
Renta estatal acumulada carbón térmico	Musd	56133	61490	10%	50471	55102	9%	17490	18607	6%
Renta estatal acumulada carbón metalúrgico	Musd	6703	23487	250%	6093	20826	242%	3514	8067	130%
Renta estatal acumulada oro	Musd	14759	14925	1%	8691	8750	1%	4704	4707	0%
Inversión total local acumulada carbón	Musd	46730	57393	23%	42860	52273	22%	20562	23935	16%
Inversión total local acumulada oro	Musd	11063	11136	1%	7539	7569	0%	4703	4704	0%
Empleo directo máximo carbón	Personas	20143	34193	70%	20359	34271	68%	17224	18742	9%
Empleo directo máximo oro	Personas	99649	103319	4%	73925	73925	0%	73925	73925	0%

En la Figura 68, Figura 69 y Figura 70 se muestran los principales resultados para los escenarios, en estas se observa que las variables con principales cambios son la producción, renta minera y conflicto social. En todos los escenarios aumenta la producción y la renta minera estatal por carbón metalúrgico, y disminuye el conflicto social.

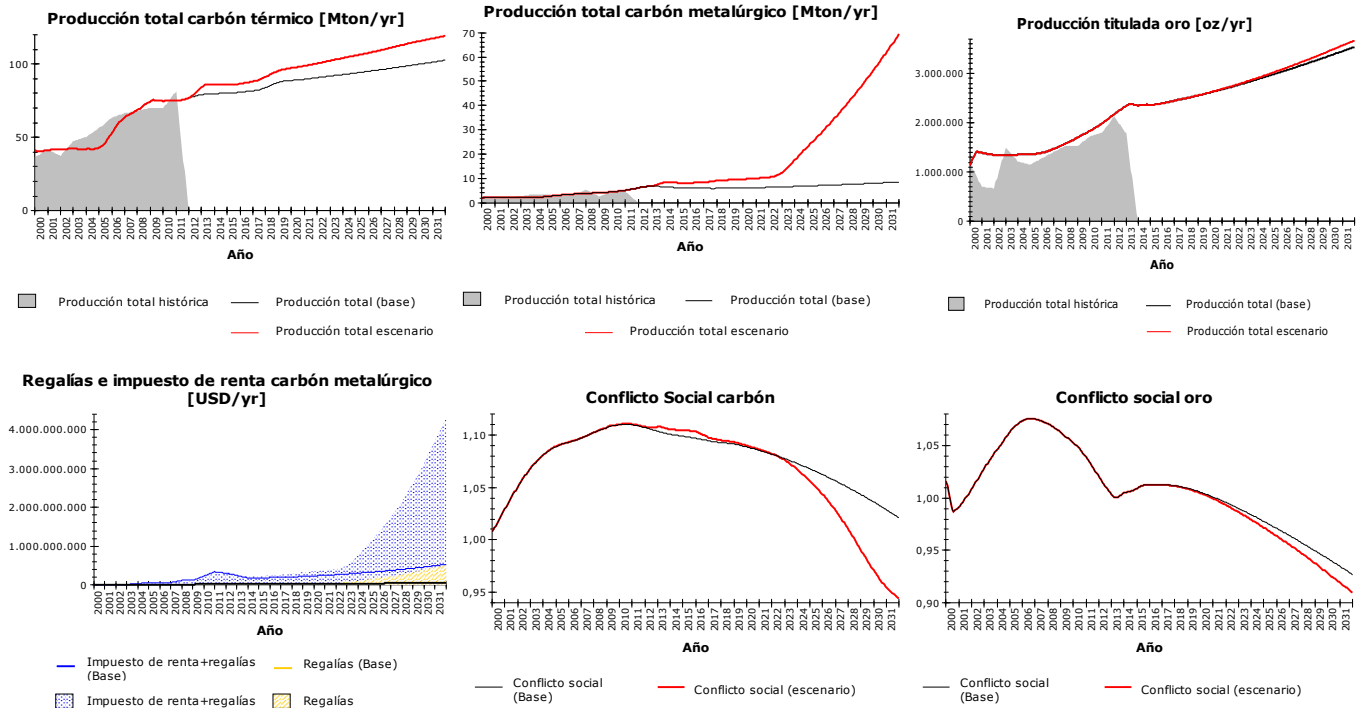


Figura 68 – Resultados de encadenamientos productivos en el escenario “los años maravillosos”

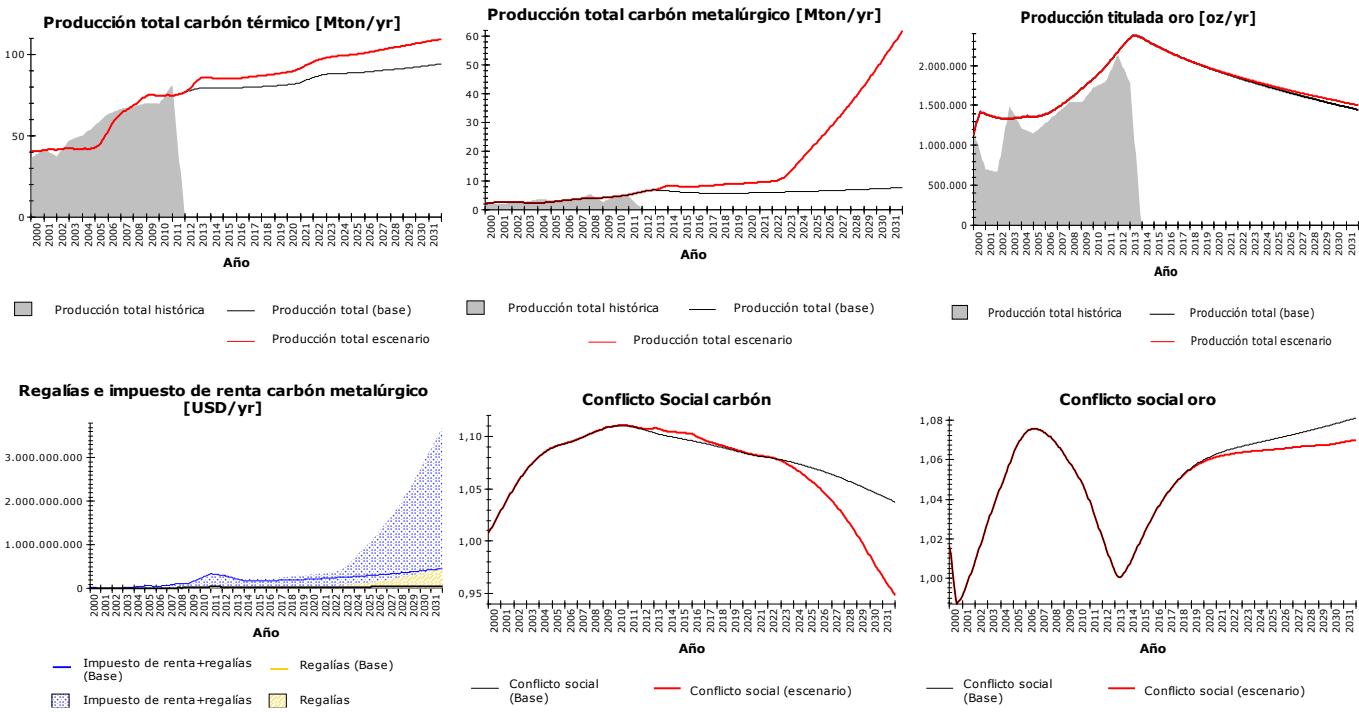


Figura 69 – Resultados de encadenamientos productivos en el escenario “unas de cal y otras de arena”

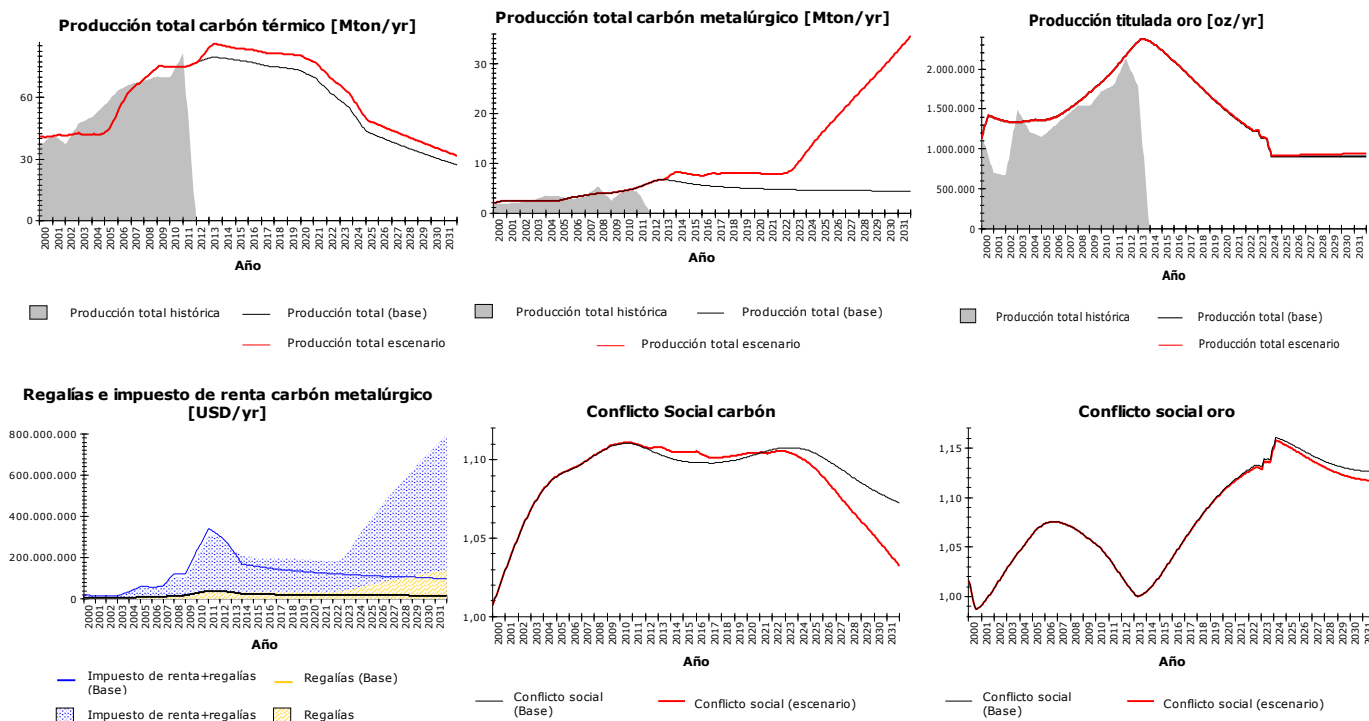


Figura 70 – Resultados de encadenamientos productivos en el escenario “sin el pan y sin el queso”

Los encadenamientos productivos de carbón conllevan a la creación de cerca de 2400 empleos indirectos para 2032 (2000 en siderúrgicas y 400 en termoeléctricas), como se muestra en la Figura 71. Este aumento del empleo y el aumento de la inversión local disminuyen las necesidades básicas insatisfechas y, por ende, el conflicto social. El aumento en la producción lleva también a un aumento en la contaminación, pero el efecto en el conflicto social es mínimo. Adicionalmente, la industria siderúrgica puede llegar a aportar 250 millones de dólares de valor agregado en 2032, y las centrales térmicas cerca de 700 millones de dólares.

El encadenamiento de industria joyera no presenta aumentos en la producción total de oro en ningún escenario. Esto se da principalmente a que este sector sigue estando dominado por el precio. Sin embargo, se puede alcanzar hasta 2300 empleos indirectos en 2032, y aportar cerca de 42 millones de dólares, como se muestra en la Figura 71. Para todos los escenarios, los empleos indirectos y el valor agregado se mantienen en los mismos valores, pues éstos dependen directamente de las nuevas demandas internas, y no de variables como precios internacionales, costos de la minería, etc.

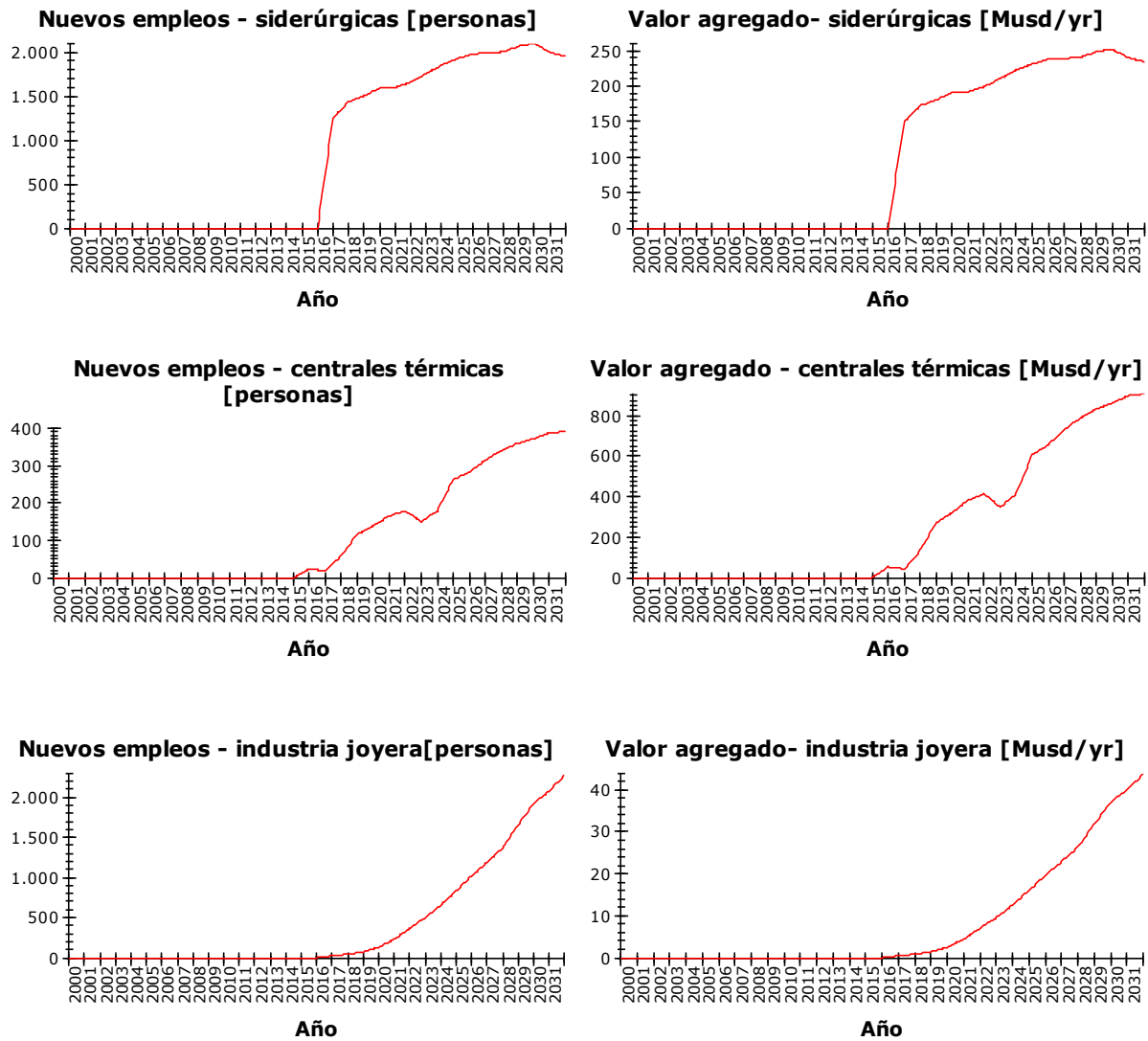


Figura 71 – Nuevos empleos y valor agregado de encadenamientos productivos.

8.7 Solución integral

Hasta el momento se han observado el efecto de estrategias individuales en cada uno de los escenarios propuestos. En este numeral se analiza el efecto de combinar varias estrategias para analizar como la ocurrencia de sinergias eventualmente podría lograr una mejora mayor en el sector. Para ello se seleccionan los valores medios de algunas estrategias: aumento de la fiscalización a 80%, aumento de la tasa de formalización a 5%, aumento del conocimiento geológico al 20%. De igual forma se aplica la estrategia de encadenamientos productivos y la estrategia de competitividad (estabilidad jurídica, infraestructura y

seguridad altas). Los resultados de las simulaciones con la combinación integral de estas estrategias se muestran en la Tabla 37.

Tabla 37 – Resultados de solución integral en cada escenario.

Variable	Und.	Los años maravillosos	Unas de cal y otras de arena	Sin el pan y sin el queso
Producción titulada acumulada - Cbn term	Mton	2.680,52	2.576,19	1.961,75
Producción titulada acumulada - Cbn met	Mton	486,21	448,08	328,58
Producción titulada acumulada - Oro	Moz	75.246.832,51	56.371.222,16	47.473.902,47
Producción no titulada acumulada - Oro	Mton	7.980.636,87	7.945.448,12	7.379.293,65
Renta minera estatal acumulada - Cbn term	Musd	61.490,73	55.099,11	18.262,00
Renta minera estatal acumulada - Cbn met	Musd	28.744,28	25.645,70	9.364,33
Renta minera estatal acumulada - Oro	Musd	17.300,22	9.595,45	4.830,90
Renta minera estatal acumulada - Caliza	Musd	171.236.114,07	130.428.674,06	1.078.023,85
Inversión local acumulada - Cbn	Musd	59.549,67	54.260,84	24.254,71
Inversión local acumulada - Oro	Musd	12.462,46	8.121,65	4.811,71
Inversión local acumulada - Caliza	Musd	112.914.971,20	88.614.388,78	11.193.167,78
Max empleo cbn	personas	34.193,45	34.271,13	18.742,73
Max empleo oro	personas	103.586,11	73.925,01	73.925,01
Max empleo Caliza	personas	31.765,93	29.130,40	19.187,48
Material particulaedo - Cbn	Ug/m3	745,42	762,62	253,25
Mercurio acumulado	Ug/m3	539,77	268,10	176,30
Cianuro	mgr/m3	3.493,80	1.735,34	1.237,14
Material particulado – Caliza	Ug/m3	2.120,27	1.962,87	1.293,73
Reservas en desarrollo - Cbn term	Mton	1.052,27	946,32	68,19
Reservas en desarrollo - Cbn met	Mton	602,18	545,35	585,69
Reservas en desarrollo - Cbn oro	Moz	35.366.547,73	13.718.576,97	2.858.303,83
Reservas en desarrollo - Cbn Caliza	Mton	498,88	388,34	7,40
Reservas en probables - Cbn term	Mton	4,93	5,02	2.040,64
Reservas en probables - Cbn met	Mton	1,00	0,99	292,18
Reservas en probables - Cbn oro	Moz	65.520,57	38.626.176,53	58.951.830,81
Reservas en probables - Cbn Caliza	Mton	1,00	28,99	1.285,19
Reservas en probadas - Cbn term	Mton	3.271,03	3.490,71	2.950,03

En el escenario de los “años maravillosos” (Figura 72) se observa que la estrategia integral mejora el desempeño en variables como producción, inversión y conflicto social; sin embargo aumenta la cantidad de contaminantes, especialmente en el caso del carbón, y la atractividad no presenta un incremento marcado.

En el escenario de “unas de cal y otras de arena” (Figura 73) los efectos creados por la estrategia integral son más notorios que el caso de “los años maravillosos”. La producción en todos los minerales aumenta, al igual que la atraktividad, pero con un costo ambiental mucho mayor.

Para el caso de “sin el pan y sin el queso” (Figura 74) la estrategia mejora principalmente la producción del carbón metalúrgico, con efectos leves en el carbón térmico y nulos en oro y caliza. Sin embargo se nota mejorías en variables como la renta, la inversión local y la atraktividad.

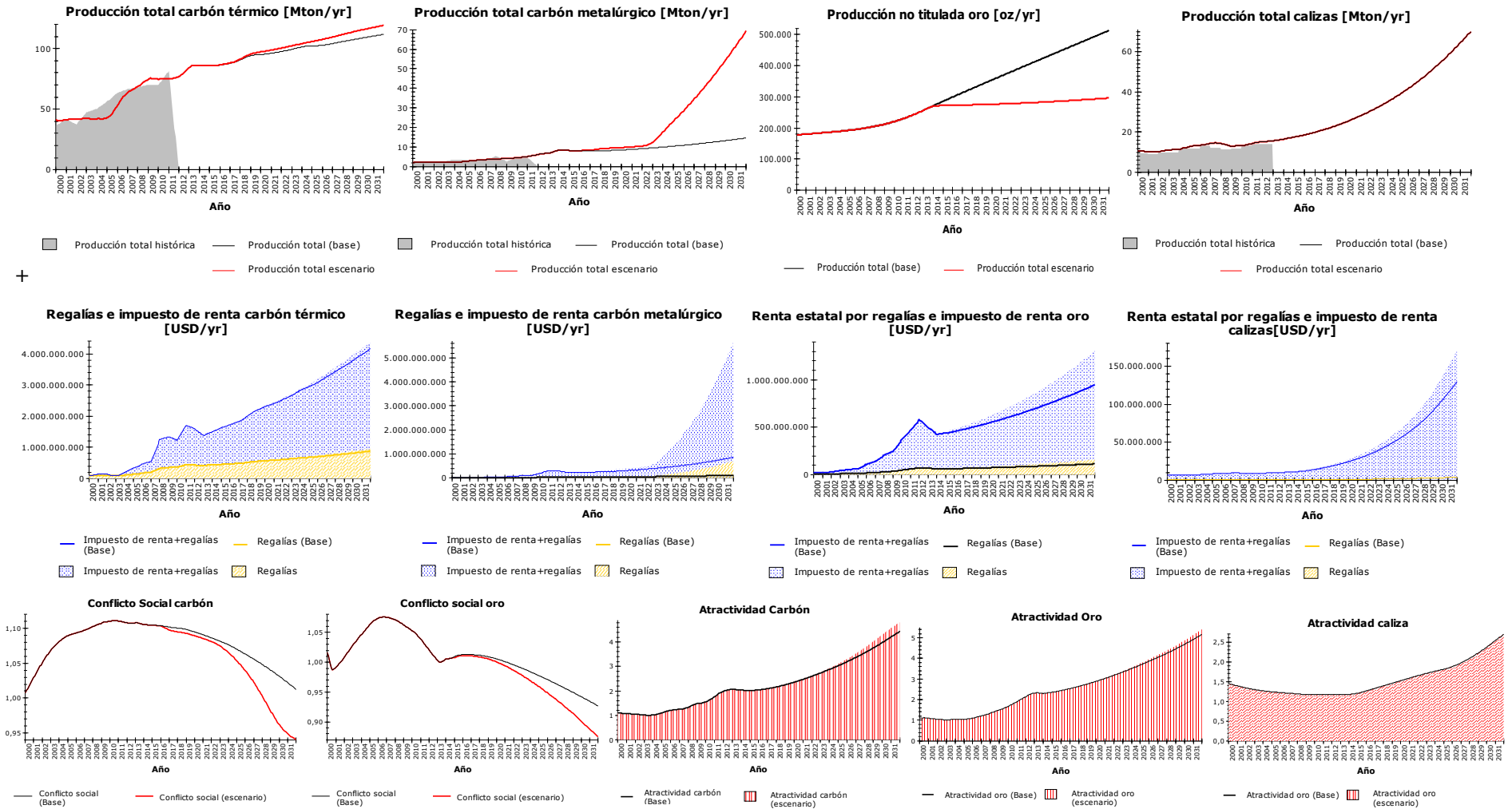


Figura 72 – Resultados de solución integral en el escenario “los años maravillosos”.

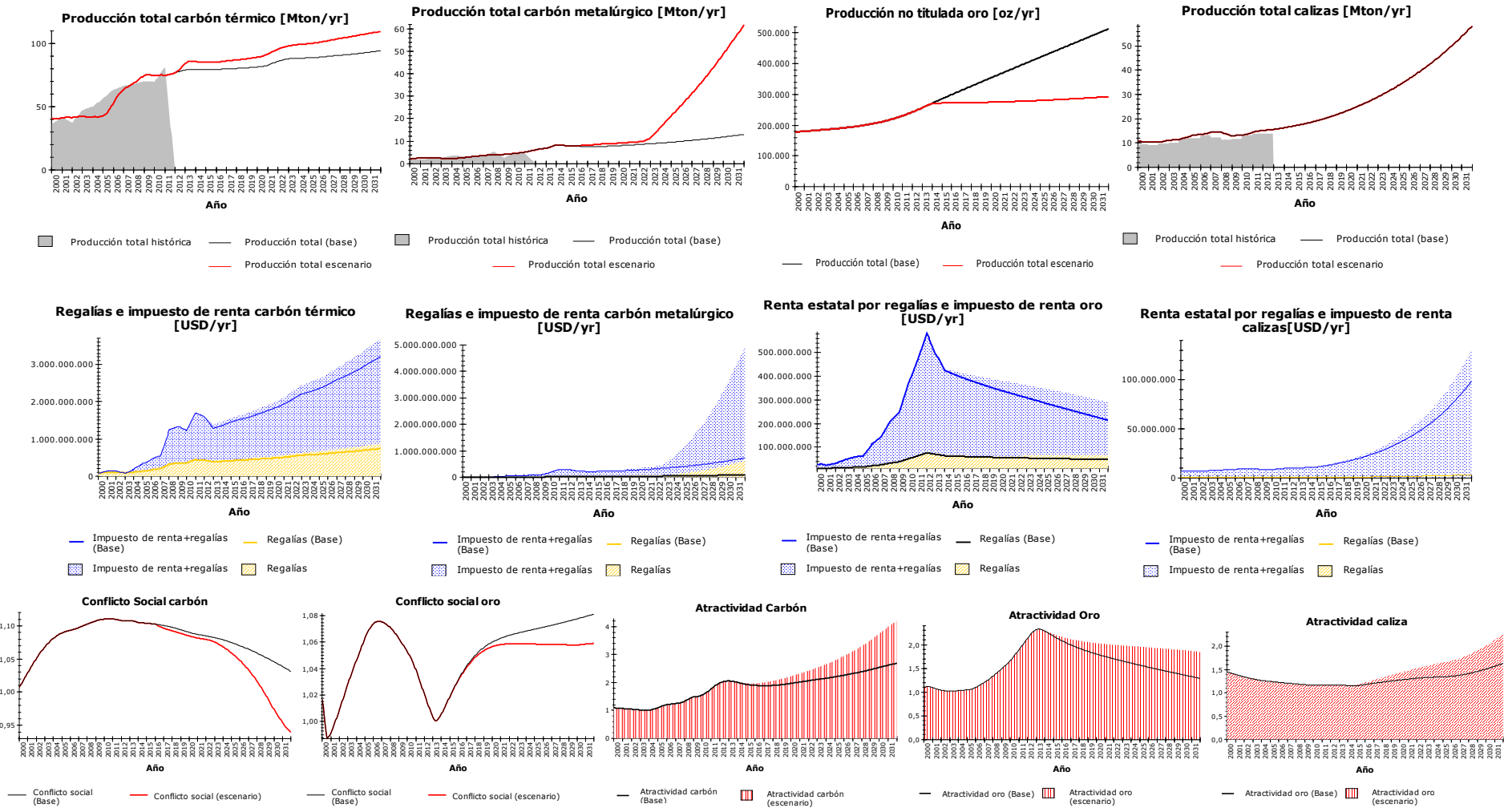


Figura 73 – Resultados de solución integral en el escenario “unas de cal y otras de arena”.

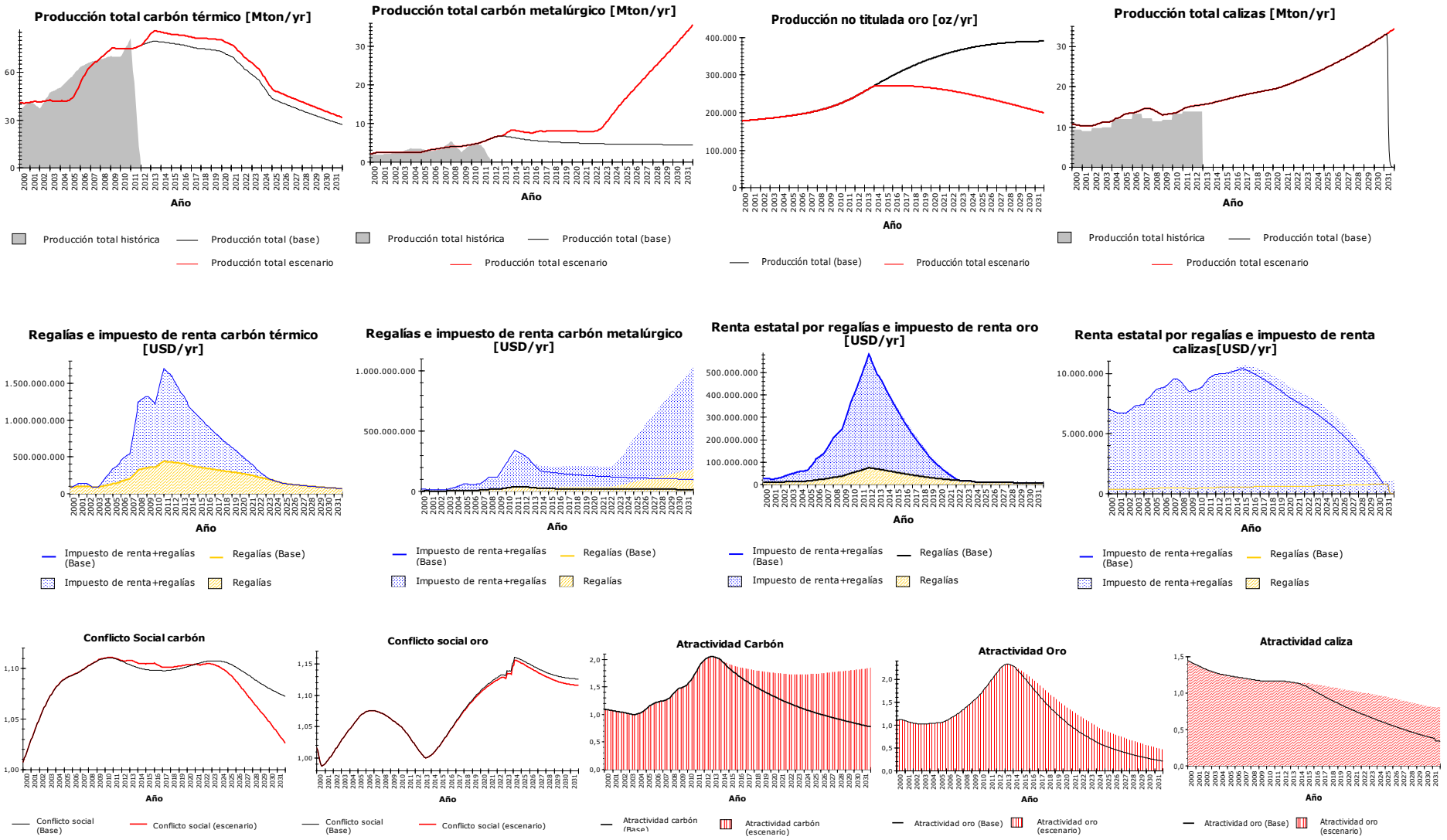


Figura 74 – Resultados de solución integral en el escenario “sin el pan y sin el queso”.

9. Conclusiones

La industria de extracción minera ha sido por años motor de la economía colombiana. Si bien, ha dejado gran cantidad de recursos económicos en el país: mayor renta estatal, gran número de empleos directos e indirectos, altas inversión local- todo ello permitiendo mejorar el bienestar social no ha sido ajena a un sin número de problemas: volatilidad en los precios, actores ilegales, altas tasas de contaminación, rechazo social y desequilibrio económico local. Algunas variables son exógenas al Gobierno Nacional, como los precios o la atractividad de otros países que le son competencia en el mercado internacional, pero el gobierno si tiene un amplio radio de acción: previendo los posibles futuros de esas variables en la que no infiere directamente y adoptando políticas beneficiosas y robustas ante estas incertidumbres. Puede, además, sobre las que si tiene inferencia directa, implementar estrategias que superen estas dificultades, como programas de legalización o de mayor conocimiento geológico. Sin embargo, la modelación del sistema permitió inferir, que no existe una estrategia que por sí sola tenga efectos notables en el sistema, pues el sector es un sistema complejo y si se altera positivamente un subsistema, como el de producción, puede afectarse negativamente otro como el ambiental. Una estrategia integral permitiría mejoraras considerables en todo el sistema: mayor renta minera, mayor número de empleos, mayor productividad. Sin embargo, el problema de contaminación resalta como un aspecto clave que si no se considera en el plan global, su efectividad se retrae. El cuidado ambiental y las mejoras tecnológicas ameritan un mayor estudio como eje transversal a la efectividad de las demás estrategias.

En este trabajo se desarrolló un modelo del sector minero colombiano a nivel de agregación nacional. A partir de un modelo de Dinámica de Sistemas se analizó, de forma agregada, el sector de la industria minera en Colombia como un **sistema complejo** en el que, a partir de la interacción entre una gran cantidad de variables tecnológicas, económicas, ambientales, sociales y físicas emergen propiedades y comportamientos del sistema no previsibles de forma trivial: por ejemplo si se aumenta la producción, lo cual es positivo para el sector, se puede generar un mayor conflicto social por el aumento en afectaciones ambientales lo que repercute en la atractividad del país y por lo tanto en la producción. De esta manera se logró, no solo entender el comportamiento del sector en el pasado, sino intuir cómo podría ser en el futuro y cómo podríamos afectarlo a partir de políticas, para enfrentar las barreras y fomentar resultados positivos para el sector y para la nación.

Se modelaron subsistemas interrelacionados: producción, ambiental, económico, financiero, social y de encadenamientos productivos y se modelaron explícitamente las industrias de 3 minerales estratégicos para el desarrollo del país: carbón (térmico y metalúrgico), oro y caliza.

La modelación implicó una amplia búsqueda de información confiable, la discusión entre el equipo de trabajo UPME-UNAL, el apoyo de un experto internacional y muchísimas horas de discusiones y trabajo, que permitieron hacer supuestos validos sobre la información con la que no se contaba explícitamente.

Hacia el futuro algunas de las variables son inciertas y no dependen directamente de las acciones del gobierno nacional. La forma de evaluarlas es considerar posible resultados realistas sobre ellas y para ello se basó en el proyecto previo “Escenarios Mineros para Colombia” (UPME; UNAL, 2013) que identifico las variables de mayor incertidumbre y mayor impacto: calidad de la institucionalidad, precios y producción, sostenibilidad ambiental, economía y desarrollo, percepción de las comunidades, cultura de la corrupción y control social. A partir de esta valoración cualitativa, en este proyecto se modelaron, cuánticamente, tres escenarios mediante la combinación del posible desarrollo futuro de las variables inciertas.

Otras variables son producto de las acciones del gobierno, contenidas en “estrategias”, que dependiendo del cruce entre estas acciones y la revelación de las incertidumbres en el futuro podrían dar resultados positivos o negativos para el sector y el desarrollo del país. En el proyecto anterior “Escenarios Mineros para Colombia” (UPME; UNAL, 2013) se identificaron algunas estrategias que podrían tener mucho impacto en el sector, y con base en ellas, en el modelo se expresaron cualitativamente, de forma directa o indirecta, con el fin de cruzarlas con los escenarios, de forma tal que el modelo permitiera la comprensión del efecto de cada una de las estrategias (o combinaciones de ellas) en caso de que se haga realidad cada uno de los escenarios futuros, con el fin de identificar cuáles serán las estrategias o combinaciones de estas más efectivas y robustas.

Las variables de producción y reservas para los distintos minerales fueron explícitamente modeladas y por lo tanto es posible conocer su evolución en el futuro, dados los supuestos de precios y otros factores (distintos escenarios). Para cada escenario es posible conocer esa evolución.

El modelo igualmente muestra la evolución de la inversión y de la renta estatal por regalías e impuesto a la renta, para cada mineral en cada escenario, dados unos supuestos de precios y otras variables. En este sentido se puede entonces medir los beneficios del Estado colombiano por la renta minera. Acá no se hace diferencia entre la inversión nacional y la extranjera. Pero esta diferencia se puede deducir de los resultados y del tipo de mineral. Se espera que nuevas inversiones en carbón térmico en el país sean de inversionistas extranjeros,

mientras que para el carbón metalúrgico se espera en general que las inversiones sean nacionales (mientras sean de dimensiones similares a las actuales). Para la caliza, dado que no se exporta, en general la inversión va a ser interna. Para el oro depende de la magnitud de los desarrollos que den como resultado en el modelo. En general desarrollos mineros importantes requieren de inversión extranjera.

El tema de formalización/legalización de la minería sólo fue considerado para el oro. La producción minera titulada (formal) y la producción no titulada (informal o ilegal) fueron explícitamente modeladas en el caso de este mineral. Dada una eficiencia del programa de titularización de la minería del oro, y otros factores, es posible definir el impacto de un los programas de titularización (formalización) en la producción del oro.

El marco regulatorio del sector minero está inmerso en el modelo. El modelo considera los parámetros regulatorios definidos por el gobierno. Las variables que componen este módulo son en su mayoría exógenas al modelo; estas variables exógenas son: tasa de impuestos, capacidad de fiscalización y porcentajes de regalías. Por otro lado el precio de liquidación de regalías depende del precio de cada mineral. Igualmente se consideran normas ambientales por medio de las acumulaciones permisibles de contaminantes específicos. Variando, por ejemplo, la tasa de impuestos o los porcentajes de regalías (cambios en las normas) se puede analizar su impacto en la producción de cada mineral.

El análisis de la simulación de diferentes estrategias se observa que para lograr una minería más competitiva en el país se analiza el impacto que tendría la variación de esta normativa (tasa de impuestos, porcentaje de regalías, acumulaciones de contaminantes permisibles, otros), y otros aspectos técnicos (reservas probadas, infraestructura, estabilidad jurídica y seguridad, entre otros), en todos los escenarios, sobre la evolución de la producción minera. Un conjunto de condiciones que mejoren de manera significativa la producción minera muestra las condiciones que se requieren para hacer más competitivo al país en el sector minero.

Los resultados de las simulaciones muestran que la efectividad de las estrategias varía de acuerdo al escenario en el que se corren, especialmente en aquellas estrategias que se encuentran ligadas al nivel de producción. También se puede observar que no hay una estrategia individual que mejore todas las variables del modelo, esto se debe a los ciclos de balance internos y a la naturaleza opuesta de algunas variables como producción y contaminación. De igual forma, se puede observar que si bien en algunas de las estrategias se esperaba un mayor impacto, internamente los efectos se ven reducidos debido a comportamientos contra intuitivos.

La estrategia de mejoras en institucionalidad muestra aumentos en la renta minera estatal por lo que crece la inversión y disminuye el conflicto social, lo que al final repercute en la atractividad del país para las

empresas mineras. Sin embargo, en general, no afecta la producción porque que tiene mayor influencia del precio. Sus efectos son diferentes según el escenario que ocurra en el futuro, pues si los precios son bajos el aumento en el recaudo por fiscalización no sería suficiente para disminuir el conflicto social ni mejorar la atraktividad.

La estrategia de competitividad se relacionó directamente con las políticas de mejorar la “seguridad” y un mayor desarrollo de “infraestructura”. En general, se encontró que tiene un buen efecto en la atraktividad, lo que a su vez modifica las tasas de descubrimiento y desarrollo de los minerales. Sin embargo, esto no alcanza a lograr cambios positivos en la producción si el escenario no es el “los años maravillosos” donde los precios son más altos.

La estrategia de conocimiento geológico modifica los valores de reservas. Sin embargo, esta estrategia no logra que se dé un aumento de la producción. Esto se debe a que la inversión en reservas probables no tiene mayor relevancia debido al abastecimiento suficiente de reservas que se tiene en el momento., inclusive en el escenario de los años maravillosos donde el uso de reservas es mayor.

La estrategia de incentivos tributarios disminuye los valores de “tasa de impuestos”, y “porcentaje de regalías”. Sus efectos son diferentes según el mineral de análisis. Para el carbón aumenta la atraktividad debido a que aumenta la rentabilidad del negocio, lo que lleva a una mayor actividad minera y aumento del empleo, pero este no disminuye el conflicto social, debido a aumentos en la contaminación. Para el oro, el precio sigue gobernando toda la actividad. Para la caliza la producción no aumenta debido a que está ligada a la demanda interna. En general, en los escenarios que no van acompañados de altos niveles de producción, el efecto de la estrategia no es muy importante.

Las mejoras en efectividad de planes de formalización y legalización sólo se consideraron para el oro. Si bien, se observa en todos los escenarios que la producción no titulada disminuye, en el caso de “los años maravillosos” y “unas de cal y otras de arena” se observa la tendencia a aumentar, mientras que en el caso de “sin el pan y sin el queso” la producción tiende a acabarse; esto se debe principalmente a que, pese los esfuerzos del gobierno, los precios altos llevan a que la atraktividad en la informalidad sea mayor y la tasa de nuevas UPM no tituladas sea mayor que la de formalización, caso contrario cuando los precios del oro decrecen.

En los encadenamientos productivos se planteó el ingreso de una nueva demanda interna de carbón metalúrgico, térmico y oro, destinadas a suplir una nueva industria en el país, y una nueva demanda de carbón metalúrgico de exportación debido a la construcción de infraestructura para su transporte. Para el

carbón, las variables con principales cambios son la producción, renta minera y conflicto social. En todos los escenarios aumenta la producción y la renta minera estatal por carbón metalúrgico, y disminuye el conflicto social. Conlleva, además, a la creación de cerca de 2400 empleos indirectos para 2032 y a un aumento de la inversión local lo que disminuye las necesidades básicas insatisfechas y, por ende, el conflicto social. El aumento en la producción lleva también a un aumento en la contaminación, pero el efecto en el conflicto social es mínimo. El encadenamiento de industria joyera no presenta aumentos en la producción total de oro en ningún escenario, pues ésta sigue estando dominada por el precio. Para todos los escenarios, los empleos indirectos y el valor agregado se mantienen en los mismos valores, pues éstos dependen directamente de las nuevas demandas internas, y no de variables como precios internacionales, costos de la minería, etc.

Se observó que estrategias aisladas producen efectos positivos en algunas variables, pero debido a la complejidad de interrelaciones, propiedad de un **sistema complejo** como lo es el sector minero, no se alcanza los efectos deseados en otras variables.

La estrategia integral, permite un desarrollo general, con aumentos en la producción, en la renta y aspectos sociales, con un mayor efecto en el escenario medio, sin embargo se observa un aumento en los niveles de contaminación, por lo que se requiere implementar estrategias tecnológicas que se encaminen hacia una producción más limpia.

Trabajo futuro

El modelo desarrollado es un modelo del sector minero colombiano a nivel nacional. En este sentido no puede modelar, y por lo tanto considerar, resultados a nivel regional o local. Resultados entonces como impactos locales de la producción minera no son posibles de obtener con este modelo. Por ejemplo, los impactos de la regalías en determinadas regiones o qué tanto valor agregado (encadenamientos) genera la minería en las regiones no son posibles de analizar con este modelo. Sin embargo, se recomienda, a partir de los resultados de este modelo, ahondar y modelar subsistemas específicos de forma más detallada (mediante simulación y otros tipo de modelación como optimización y modelo econométricos) como el del **recurso humano, procesos de fiscalización o mejoras tecnológicas**, entre otras. Se tiene la ventaja adicional que ya se cuenta con gran cantidad de datos recolectados y un abanico de ideas, análisis y conclusiones del presente proyecto, que ya serian un avance importante previo a esta tarea.

Hay una serie de inquietudes que no fueron modeladas explícitamente en el modelo pero que se pueden analizar sus efectos de manera indirecta con el uso del modelo. Por ejemplo, el efecto del **cambio climático** puede ser analizado considerando que las fuentes de agua incluidas tienen caudales promedios significativamente menores que los actuales, lo cual generará un conflicto por el uso del agua. En este caso en el módulo ambiental las variables de oferta hídrica e índice de uso del agua se verán afectadas y se usarán cantidades significativamente menores que las condiciones promedio. Igualmente sucede con los usos futuros de los minerales o con los encadenamientos productivos. Finalmente estos factores afectan directamente la demanda por los minerales. Se puede entonces analizar su impacto con el modelo variando las demandas por los minerales y mirando los resultados.

Una de las limitaciones es que el modelo no permite el análisis regional y por lo tanto no es posible obtener resultados como impactos locales de la producción minera. Por ejemplo, los impactos de la regalías en determinadas regiones o qué tanto valor agregado (encadenamientos) genera la minería en las regiones no son posibles de analizar con este modelo. Otra limitación es que el modelo no hace modelación explícita del impacto de la renta estatal minera resultante con el PIB del país. No es entonces posible, como resultado del modelo, conocer, por ejemplo, la evolución de la participación del sector minero en el PIB.

Referencias

- Ada Alegre Consultores. (2011). Norma Actualizada al 14 de marzo 2011, 1–8.
- Agarwal, C., Green, G. M., Grove, J. M., Evans, T. P., & Schweik, C. M. (2002). *A Review and Assessment of Land-Use Change Models : Dynamics of Space , Time , and Human Choice*. Newtown Square, PA: U.S.: Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station.
- Anglogold Ashanti. (2011). Proyecto de exploración La Colosa.
- Angulo, L. C., Huertas, J. I., & Restrepo, G. M. (2011). Caracterización de Partículas Suspendidas (PST) y Partículas Respirables (PM 10) producidas en Áreas de Explotación Carbonífera a Cielo Abierto. *Información Tecnológica*, 22(4), 23–34. doi:10.4067/S0718-07642011000400004
- ATICO MINING. (2013). Technical Report El Roble copper-gold project.
- Atlas Copco. (n.d.). Trends in exploration.
- Banco de la República de Colombia. (2014a). Flujos de Inversión Extranjera Directa en Colombia. Retrieved September 30, 2014, from <http://www.banrep.gov.co/inversion-directa>
- Banco de la República de Colombia. (2014b). Metales preciosos. Retrieved August 28, 2014, from <http://www.banrep.gov.co/es/metales-preciosos>
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183–210. doi:10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4
- Barlas, Y., & Carpenter, S. (1990). Philosophical roots of model validation : two paradigms. *System Dynamics Review*, 6(2), 148–166.
- Bjørndal, T., Herrero, I., Newman, A., Romero, C., & Weintraub, A. (2012). Operations research in the natural resource industry. *International Transactions in Operational Research*, 19(1-2), 39–62. doi:10.1111/j.1475-3995.2010.00800.x
- CATAMUTUN. (n.d.). Industria Nacional del Carbón. Retrieved December 10, 2014, from <http://www.catamutun.com/produccion/carbon/pais.html>
- Cerrejon. (2012). Informe de sostenibilidad 2012.
- Chyong Chi, K., Nuttall, W. J., & Reiner, D. M. (2009). Dynamics of the UK natural gas industry: System dynamics modelling and long-term energy policy analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 76(3), 339–357. doi:10.1016/j.techfore.2008.06.002
- Clarkson, T. W. (2002). The Three Modern Faces of Mercury Methyl Mercury in Fish History of Human Exposure, 110(February), 11–23.
- Congreso de la República de Colombia. Ley 756 de 2002 (2002). Bogotá D.C., Colombia.
- Cordy, P., Veiga, M. M., Salih, I., Al-Saadi, S., Console, S., Garcia, O., ... Roeser, M. (2011). Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita

- mercury pollution. *The Science of the Total Environment*, 410-411, 154–60. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.09.006
- Corporación para el Desarrollo del Ferrocarril de Carare. (n.d.). El Camino hacia la competitividad del Carbón.
- CRIRSCO. (2013). International Reporting Template. International Council for Mining and Metals.
- Damodaran, A. (2014a). The Data Page.
- Damodaran, A. (2014b). The Data Page. Retrieved from <http://people.stern.nyu.edu/adamodar/>
- DANE. (2005). *RESULTADOS CENSO GENERAL 2005 Necesidades Básicas Insatisfechas - NBI, por total, cabecera y resto, según municipio y nacional*.
- DRUMMOND. (2012). *Informe de sostenibilidad drummond 2012*.
- ECO ORO. (2011). Mineral Resources Angostura.
- EIA. (2014). Energy Prices. Retrieved November 20, 2014, from <http://www.eia.gov/oiaf/aeo/tablebrowser/#release=AEO2014&subject=3-AEO2014&table=15-AEO2014®ion=0-0&cases=lcst14-d120413a>
- El Banco Mundial. (2013). Población.
- Ernst & Young. (2014). Business risks facing mining and metals 2014-2015. United States.
- Ghose, M. K., & Majee, S. R. (2001). Air pollution caused by opencast mining and its abatement measures in India. *Journal of Environmental Management*, 63(2), 193–202. doi:10.1006/jema.2001.0434
- Glöser, S., Soulier, M., Espinoza, L., & Faulstich, M. (2013). Using Dynamic Stock & Flow Models for Global and Regional Material and Substance Flow Analysis in the Field of Industrial Ecology: The Example of a Global cooper flow model, (July). Retrieved from <http://www.systemdynamics.org/web.portal?P1236+0>
- Goñi Pacchioni, E. A., Sabogal Moreno, A., & Asmat, R. (2014). Minería informal aurífera en Colombia. FEDESARROLLO.
- Goonan, T. (2005). Flows of selected materials associated with world copper smelting. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Flows+of+Selected+Materials+As+sociated+with+World+Copper+Smelting#0>
- Gran Colombia Gold. (2014). Marmato Resources.
- Hyman, B., & Andersen, J. (1998). Energy Flow Models for the Steel Industry. *Zhurnal Eksperimental'noi I Teoreticheskoi Fiziki*, (8), 105–114. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>
- Indexmundi. (2014). Hystorical commodity Prices. Retrieved August 15, 2014, from <http://www.indexmundi.com/commodities/>

- INGEOMINAS. (1987). *Recursos minerales de Colombia*.
- Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*.
- Instituto Peruano de Economía. (2011). *La tributación minera en el Perú: contribución, carga tributaria y fundamentos conceptuales*.
- International Council on Mining & Metals. (2012). Trends in the mining and metals industry: Mining's contribution to sustainable development.
- INVIAS. (2014). Instituto Nacional de Vías. Retrieved November 25, 2014, from <http://www.invias.gov.co/>
- Legiscomex. (2007). Joyería y bisutería en Colombia.
- Li, J., & Miller, J. . (2002). Reaction kinetics for gold dissolution in acid thiourea solution using formamidine disulfide as oxidant. *Hydrometallurgy*, 63(3), 215–223. doi:10.1016/S0304-386X(01)00212-2
- Li, J., & Miller, J. D. (2006). a Review of Gold Leaching in Acid Thiourea Solutions. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 27(3), 177–214. doi:10.1080/08827500500339315
- Logsdon, M. J., Hagestein, K., & Mudder, T. I. (2001). *EL MANEJO DEL CIANURO EN LA EXTRACCIÓN DE ORO*.
- Mason, R. P., Choi, A., Fitzgerald, W., Hammerschmidt, C., Lamborg, C., Soerensen, A. L., & Sunderland, E. (2012). Mercury biogeochemical cycling in the ocean and policy implications. *Environmental Research*, 119, 101–117.
- Meister, W. G. (n.d.). Cost trends in Mining.
- MINATURA. (2014). Portafolo de proyectos MAC.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. RESOLUCION 0601 DE 2006 (2006).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (2013). Ley no. 1658.
- Ministerio de Transporte. (2013a). Plan Vial Regional. Retrieved November 20, 2014, from <http://web.mintransporte.gov.co/pvr/>
- Ministerio de Transporte. (2013b). Transporte en cifras - Estadísticas 2013. Bogotá D.C., Colombia.
- Miranda, O., M. Liotta, A. Olguin, A. D. (2010). El consumo hídrico de la agricultura y la minería aurífera en la cuenca del río jáchal, provincia de san juan, argentina, (5427).
- MME, & INGEOMINAS. (2004). EL CARBÓN COLOMBIANO. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Minas y Energía. Retrieved from http://www.simco.gov.co/simco/documentos/Seg_Minera/El_Carbon_Colombiano.pdf
- MME, & UPME. (2011). *Anuario estadístico minero colombiano*. Bogotá D.C., Colombia. Retrieved from <http://www.simco.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=rDDN5zSCgEo=&tabid=96>

- Mohr, S., Höök, M., Mudd, G., & Evans, G. (2011). Projection of long-term paths for Australian coal production—Comparisons of four models. *International Journal of Coal Geology*, 86(4), 329–341. doi:10.1016/j.coal.2011.03.006
- Morales, Gómez, T., Águeda Casado, E., García Jiménez, J. L., & Navarro, J. M. (2011). *Mecanizado Básico para electromecánica* (p. 304). Editorial Paraninfo. Retrieved from http://books.google.com/books?id=_ESsEd-4OYUC&pgis=1
- Morecroft, J. (2007). *Strategic Modelling and Business Dynamics: A Feedback Systems View* (p. 464). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Muñoz, A., Quiroz, C., & Paz, J. (2006). *Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud en adultos que laboran a diferentes niveles de exposición*.
- Murakami, S., Yamanoi, M., & Adachi, T. (2004). Material flow accounting for metals in Japan. *Materials* ..., 45(11), 6–9. Retrieved from <http://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/45/11/3184.pdf>
- Naill, R. (1977). *Managing the energy transition*. Cambridge: Ballinger Publishing Co.
- Naill, R. (1992). A system dynamics model for national energy policy planning. *System Dynamics Review*, 8(1), 1–20.
- Northey, S., Mohr, S., Mudd, G. M., Weng, Z., & Giurco, D. (2014). Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 190–201. doi:10.1016/j.resconrec.2013.10.005
- O'Regan, B., & Moles, R. (2001). A System Dynamics Model of Mining Industry Investment Decisions within the Context of Environmental Policy. *Journal of Environmental Planning and Management*, 44(2), 245–262. doi:10.1080/09640560120033731
- O'Regan, B., & Moles, R. (2004). The dynamics of relative attractiveness—a case study in mineral exploration and development. *Ecological Economics*, 49(1), 73–87. doi:10.1016/j.ecolecon.2003.11.010
- O'Regan, B., & Moles, R. (2006). Using system dynamics to model the interaction between environmental and economic factors in the mining industry. *Journal of Cleaner Production*, 14(8), 689–707. doi:10.1016/j.jclepro.2004.05.006
- Olaya, Y., & Dyner, I. (2005). Modelling for Policy Assessment in the Natural Gas Industry. *The Journal of the Operational Research Society*, 56(10), 1122–1131.
- Organización mundial de la salud. (2002). Evaluación mundial sobre el mercurio.
- Ortiz, A. M., & Londoño, T. A. (2013). Estudio sobre los impactos socio-económicos del sector minero en Colombia: encadenamientos sectoriales.
- Pidd, M. (1999). Just modeling through : A rough guide to modeling. *Interfaces*, 29, 118–132.

- Portafolio. (2013). Organización G&J construirá planta siderúrgica en el país. Retrieved December 10, 2014, from <http://www.portafolio.co/negocios/gj-construira-planta-siderurgica-el-pais>
- PRODECO. (2011). Nuestro Informe de Sostenibilidad 2011.
- Pruyt, E. (2010). Scarcity of Minerals and Metals : A Generic Exploratory System Dynamics Model. In *International Conference of System Dynamics Society*.
- Riera, P., Garcia, D., Kristrom, B., & Brennlund, R. (2005). *Manual de economia ambiental y de los recursos naturales*.
- Rodrigues-filho, S., Hinton, J., Veiga, M., Beinhoff, C., & Huibobro, P. (2005). Global Mercury Project Strategies to Reduce Hg Exposure in ASM, (September), 22–23.
- Rosenau-Tornow, D., Buchholz, P., Riemann, A., & Wagner, M. (2009). Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends. *Resources Policy*, 34(4), 161–175. doi:10.1016/j.resourpol.2009.07.001
- SEAFIELD RESOURCES. (2014). Overview of Quinchía gold project.
- Shafiee, S., Nehring, M., & Topal, E. (2009). Estimating Average Total Cost of Open Pit Coal Mines in Australia. *Australian Mining Technology Conference*, (October), 134–145.
- Sohn, I. (2005). Long-term projections of non-fuel minerals: We were wrong, but why? *Resources Policy*, 30(4), 259–284. doi:10.1016/j.resourpol.2006.03.002
- Spatari, S., Bertram, M., Gordon, R. B., Henderson, K., & Graedel, T. E. (2005). Twentieth century copper stocks and flows in North America: A dynamic analysis. *Ecological Economics*, 54(1), 37–51. doi:10.1016/j.ecolecon.2004.11.018
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. (McGraw-Hill, Ed.)*Management* (2nd ed.).
- Sverdrup, H., Koca, D., & Ragnarsdottir, K. V. (2014). Investigating the sustainability of the global silver supply, reserves, stocks in society and market price using different approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 121–140. doi:10.1016/j.resconrec.2013.12.008
- Sverdrup, H. U., Ragnarsdottir, K. V., & Koca, D. (2014). On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 158–174. doi:10.1016/j.resconrec.2014.03.007
- Tanaka, M., Iep, H., Revesz, B., Cipca, D., Ricard, X., & Cbc, D. E. (2007). Minería y conflicto social.
- U . S . Department of the Interior;, & U.S. Geological Survey. (2004). *Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States U . S .*

- UPME. (2010). BOLETÍN ESTADÍSTICO DE MINAS Y ENERGÍA 1990-2010. Bogotá D.C., Colombia: Unidad de Planeación Minero Energética. Retrieved from <http://www.simco.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=ABaDJv5Q1Jo=&tabid=110>
- UPME. (2012). *Boletín Estadístico de Minas y Energía 2007-2011*. Bogotá D.C., Colombia: Unidad de Planeación Minero Energética. Retrieved from <http://www.simco.gov.co/Portals/0/publicaciones/Boletín Baja Estadístico UPME 2007-2011.pdf>
- UPME. (2013). Plan de Expansión de Referencia Generación - Transmisión 2013-2027. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2014). Sistema de Información Minero Colombiano - SIMCO. Retrieved September 01, 2014, from <http://www.simco.gov.co/>
- UPME, U. de planeación minero energética-M. de minas Colombia. (n.d.-a). Capacidad Efectiva de Generación (SIN). Retrieved December 11, 2014, from [http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=/SIEL+UPME/Generación/Capacidad+Efectiva+de+Generación+\(SIN\)](http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=/SIEL+UPME/Generación/Capacidad+Efectiva+de+Generación+(SIN))
- UPME, U. de planeación minero energética-M. de minas Colombia. (n.d.-b). Consumo de Combustibles (SIN). Retrieved December 11, 2014, from [http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=/SIEL+UPME/Generación/Consumo+de+Combustible+\(SIN\)](http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=/SIEL+UPME/Generación/Consumo+de+Combustible+(SIN))
- UPME, U. de planeación minero energética-M. de minas Colombia. (2006). ALTERACIONES NEUROCOMPORTAMENTALES EN PERSONAS EXPUESTAS A MERCURIO EN LA ACTIVIDAD MINERA DEL ORO EN EL MUNICIPIO DE SEGOVIA ANTIOQUIA.
- UPME, & Universidad Nacional de Colombia. (2013). Escenarios Mineros para Colombia. Bogotá D.C., Colombia.
- Veiga, M. (2010). Antioquia, Colombia: the world's most polluted place by mercury: impressions from two field trips.
- Veiga, M. M., Nunes, D., Klein, B., Shandro, J. A., Velasquez, P. C., & Sousa, R. N. (2009). Mill leaching: a viable substitute for mercury amalgamation in the artisanal gold mining sector?, *17*, 1373–1381.
- Vieira, R. (2006). Mercury-free gold mining technologies: possibilities for adoption in the Guianas. *Journal of Cleaner Production*, *14*(3-4), 448–454. doi:10.1016/j.jclepro.2004.09.007
- Wacaster, S. (2012). The Mineral Industry of Colombia. In *2012 Minerals Yearbook*. U.S. Geological Survey (USGS).
- Wagner, L. (2008). La lucha contra la contaminación y el saqueo : de las movilizaciones en Mendoza a la unión de las reivindicaciones socioambientales en América Latina Introducción, *12*(3), 195–206.

Wilson, A., & Cervantes, M. (2014). Survey of Mining Companies.

Wood Mackenzie. (2014). Colombia coal supply summary, (November 2013).

World Economic Forum. (2014). *The Global Competitiveness Report 2014-2015*. (K. Schwab & X. Sala-i-Martin, Eds.). Geneva, Switzerland: World Economic Forum.

Anexo 1 - Taller de identificación de problema

A1.1 Cuestionario para identificación del problema

Preguntas orientadas a articulación del problema

- Plantee las cinco principales debilidades y fortalezas del sector minero en el largo plazo (2032)
- Identifique cuáles debilidades conforman el problema principal.
- ¿Cuáles son los resultados deseados o ideales para el sector minero en el largo plazo?
- ¿Si usted pudiera hablar con un clarividente que conoce el futuro, qué le preguntaría sobre el sector minero? Piense en variables que usted pueda controlar.
- ¿Cuál sería un resultado optimista pero realista? Si las cosas fueran bien para el sector minero, ¿cómo esperaría que fuera su desempeño en 2020 y 2032?
- ¿Cuál sería un resultado pesimista?

Preguntas orientadas a identificación de variables y delimitación del problema

- ¿Cuáles elementos se deben considerar en un modelo que busque dar solución al problema que se identificó en el punto anterior? Haga una lista con todas las variables que considere importantes. (Factores clave, agentes participantes, influencias sociales, políticas y económicas, fuerzas externas)
- ¿Cuáles de esas variables se pueden considerar/suponer exógenas al sector minero?, es decir, no se afectan por la dinámica misma del sector.
- ¿Cuáles variables son endógenas?, es decir, son altamente dependientes de cambios internos del sector.
- ¿Hay alguna de esas variables que se puedan excluir de un modelo del sector minero, o que sean poco importantes para el problema de interés?

Se recomienda realizar una tabla para clasificar las variables, así:

Variables endógenas	Variables exógenas	Variables excluidas
Variable x	Variable z	Variable w
Variable y		

Preguntas orientadas a detalles del modelo

- ¿Cuáles bloques o sub-sectores identifica usted en el sistema desarrollado hasta el momento? Por ejemplo bloque Ambiental, bloque económico, etc.

- ¿Cuáles minerales se deben considerar en un modelo para Colombia?
- ¿Cuáles encadenamientos productivos potenciales se pueden dar en el sector minero en Colombia?
- ¿Cuál es el tamaño relativo de una mina a pequeña escala en comparación con una a gran escala?
- Existen formas estándar de modelar la inversión en minería, pero es posible que el comportamiento de inversión a pequeña escala sea muy diferente a gran escala. ¿Cree usted que es importante desagregar el modelo según la escala? ¿Por qué?
- ¿Qué diferencias existen entre las minas a pequeña y gran escala, por ejemplo en tecnología, impactos ambientales o regulación?
- ¿Qué tan detallado debe ser el modelo de toma de decisiones?, ¿se pueden utilizar heurísticos para modelar todo el sector o se debe diferenciar entre agentes/inversionistas particulares?
- ¿Hay diferencias significativas entre minería en la superficie o profunda, que deban ser incluidas en el modelo?

A1.2 Acta de taller

Taller No.	01	Fecha	22	03	14	H.I.	08:30 am	H.F.	05:30 pm
Tema	El problema de la planeación minera en el largo plazo								
Lugar	Bogotá, Unidad de Planeación Minero Energética			Elaborada por		Jessica Arias, Juan Felipe Parra			
Asistentes	Diferentes funcionarios de la UPME, Ministerio de Minas y Energía y ANM. Ver Anexo – Lista de asistentes								

8:20 am: Bienvenida

El profesor Santiago Arango dio la bienvenida a los asistentes, presentó la agenda y los objetivos del taller. A continuación, dio paso a la presentación introductoria por parte del Doctor Ricardo Smith

8:25 am – 9:00 am: Presentación introductoria

Inicialmente, se presentó un resumen de los principales resultados del estudio de Escenarios Mineros para Colombia y las diferentes estrategias de planeación en el sector minero que se propusieron en dicho estudio. Luego, se planteó la necesidad de formular un modelo que permita probar el efecto de estrategias en el largo plazo.

A continuación se presentaron los objetivos del proyecto de simulación de estrategias para el sector minero en Colombia, los resultados esperados, el equipo de trabajo y la metodología a seguir. Se recaló la

importancia del trabajo conjunto entre la Universidad Nacional (UNAL) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), de tal forma que haya una transferencia real de conocimiento: por parte de la UPME para las especificidades de los modelos, y por parte de la universidad el conocimiento en modelación para que la UPME pueda en un futuro modificar y actualizar el modelo según las necesidades.

Se presentaron las principales ventajas de Dinámica de Sistemas como herramienta de modelamiento y algunos casos de aplicación exitosos en otros países como Argentina, Estados Unidos e Irlanda. Introduciendo a su vez el software de simulación a utilizar (Powersim Studio) y las ventajas que presenta para la modelación del proyecto propuesto.

Durante la presentación surgieron algunas inquietudes por parte de los asistentes, que se aclararon como se describe a continuación:

- **Existe falta de información en el sector minero debido a que en muchos casos no se mide los procesos o la información se encuentra desactualizada. ¿qué demanda de información tienen estos modelos?, ¿es esto un impedimento para el desarrollo del mismo?**

R: La metodología a utilizar permite plantear hipótesis (supuestos) de cómo se comportará el sistema en el largo plazo y observar posibles tendencias en el futuro. Esto se va validando a medida que se tiene la información real; en muchos casos de referencia los supuestos son acertados.

- **¿Hay algún experto en temas ambientales y sociales dentro del equipo de trabajo?, ¿Es posible incluir variables ambientales y sociales dentro del modelo?**

R: El equipo de trabajo está compuesto principalmente por expertos en modelamiento y en minería, pero los profesores a su vez cuentan con personas dentro de sus grupos de investigación que trabajan en temas ambientales y sociales, y que pueden apoyar en la formulación del modelo. Además, el modelo se construirá con la participación de la UPME, por lo que las personas expertas en ese tema podrán aportar su conocimiento. Finalmente, una de las ventajas de la metodología es que permite modelar variables blandas, como satisfacción, percepciones, etc., muy comunes en sistemas sociales.

- **¿Es posible incluir patrones de comportamiento humano dentro del modelo?**

R: Se incluirán modelos típicos de toma de decisiones, modelos de resistencia a las políticas y de la percepción de la minería por parte de la sociedad (imagen).

9:00 am – 10:00 am: Presentación de modelamiento

El profesor Erik Larsen presentó las principales características de dinámica de sistemas, herramienta que permite modelar sistemas con incertidumbre y que requiere formulación de políticas. Se enfatizó en el riesgo de buscar predicciones; como alternativa, es posible plantear escenarios posibles que den una idea de un rango de posibles comportamientos del sistema.

E. Larsen explicó cómo los modelos de simulación permiten evitar los modelos mentales, en muchos casos errados, y tomar decisiones con base en la estructura real del sistema. Además, resaltó la importancia de considerar la realimentación, y cómo medidas tomadas hoy pueden llevar a resultados indeseados en el futuro.

A continuación, explicó la diferencia entre ciclos de balance y ciclos de refuerzo, y presentó un diagrama causal de la estructura general de producción de un mineral. Luego, mostró cómo esa estructura se ve afectada por políticas nacionales. Además, mostró como la metodología de Dinámica de Sistemas permite extender la estructura a medida que se quiere profundizar en el detalle del modelo. Finalmente, hizo una pequeña introducción a diagramas de flujos y niveles, que se utilizan para la formulación matemática del modelo.

Luego de la presentación, surgió la inquietud de la posibilidad de replicar el modelo de un mineral x y extenderlo a otros. Se aclaró que se puede tomar la estructura básica y hacer ajustes o modificaciones según el caso, debido a que existen condiciones particulares para cada mineral. Sin embargo, se resaltó la existencia de variables transversales, como las políticas, que afectan a todos los minerales por igual.

10:00 am a 12:30 pm: Discusión sobre el problema del sector minero

En la primera sesión de discusión se dividió el grupo de asistentes en dos equipos de trabajo interdisciplinarios. A cada grupo se le asignó la tarea de responder las preguntas planteadas en el cuestionario que luego se discutieron entre todos los asistentes hasta llegar a un consenso. Los resultados se muestran en el Capítulo 4.

2:00 pm a 4:00 pm: Identificación de variables clave

En la segunda sesión de discusión se le pidió a cada equipo que identificara las variables que considera importantes para el desarrollo del modelo, y clasificarlas entre endógenas, exógenas o excluidas. Durante la discusión se observó que algunas variables se pueden considerar tanto endógenas como exógenas. Algunas de estas variables son: inversión extranjera, pues esta depende de la atractividad del país (interno) y de condiciones particulares del inversionista (factor externo); gestión social, que se puede dar desde otros sectores o instituciones, o desde las mismas firmas mineras. Los resultados se muestran en el Capítulo 4.

4:00 pm a 5:30 pm: Discusión sobre detalles del modelo

Se definieron los bloques del modelo, y se discutió sobre cuáles minerales y escalas de producción se deben incluir.

Taller No.	01	Fecha	23	03	14	H.I.	08:30 am	H.F.	03:00 pm
Tema	El problema de la planeación minera en el largo plazo - Entrevistas								
Lugar	Bogotá, Unidad de Planeación Minero Energética			Elaborada por		Jessica Arias, Juan Felipe Parra			
Asistentes	Diferentes funcionarios de la UPME. Ver Anexo – Lista de asistentes								

El equipo de trabajo UNAL realizó entrevistas a cuatro funcionarios de la UPME, con el objetivo de aclarar o profundizar en temas específicos, y obtener la mayor información posible para facilitar el modelamiento de diferentes componentes. Se discutieron temas como variables macroeconómicas, encadenamientos productivos, costos, precios de liquidación de regalías, comportamiento de la producción, diferencias entre minería a cielo abierto y subterránea, ilegalidad, e impacto social y ambiental. Las preguntas realizadas y sus respectivas respuestas se presentan a continuación.

Josefina González

- **¿Cuáles son las variables macroeconómicas más importantes y cómo influyen en el sector minero?**

R:

Inflación, muchos de los insumos de industria minera son importados y toman precio internacional (inflación internacional). Pero de igual forma hay insumos y variables (como el capital humano) que dependen de la inflación nacional.

Tasa de cambio: si la tasa de cambio está devaluada incentiva exportaciones, si está reevaluada es más rentable importar maquinaria por ejemplo.

Inversión extranjera directa: es mayor cuando hay una oferta alta de dólares en el mercado mundial (alta liquidez internacional). Es importante considerar la relación entre la inversión extranjera directa y la inversión nacional.

Incentivos tributarios para la inversión extranjera, que se han dado en el pasado en el país.

- **¿Por qué se han reducido los flujos de inversión extranjera?**

R: debido al crecimiento económico de grandes consumidores, como China. La desaceleración en el crecimiento de este país se ha reflejado en la demanda de minerales. Además, las nuevas regulaciones ambientales del país han desincentivado la inversión extranjera.

- **¿Qué variables consideran las firmas mineras para decidir sobre la inversión en un país?**

R: Normalmente los inversores consideran diferentes variables para tomar la decisión como: estabilidad regulatoria, posibilidades de exportar, infraestructura para exportación, riesgo país, government take, conflicto social y rentabilidad relativa del país en comparación con otros países (costo de insumos, salarios, etc.).

- **¿Cómo es la relación precio/costo?**

R: Colombia es tomadora de precios pero los costos que asume la firma se ven afectados por tasas de interés, inflación, costos, salario mínimo, etc. Sin embargo, siempre hay utilidades anuales, pues los precios bajos se compensan con periodos de precios altos. Es importante resaltar que los costos fijos de una mina son muy elevados, por lo que no justifica parar la producción cuando el precio está bajo.

Los costos fijos son: salarios, arriendos (oficinas y plantas de beneficio), capacidad de producción. Los costos variables son: transporte, muy alto en Colombia por mal estado de infraestructura, casino (comida y bebida) y contrataciones temporales.

- **¿Qué encadenamientos productivos existen en este momento y cuáles se visualizan a futuro?**

R: Los Encadenamiento hacia atrás: aquellos bienes o servicios que compra la minería a los que están antes de él, excluyendo compras en el mismo sector minero. Entre estos se destacan:

Energía eléctrica distribuida.

Transporte de carga terrestre, importante para productores a gran escala (estos suelen utilizar medios propios).

Otros aceites ligeros y medios de petróleo.

Servicio de reparación de vehículos (debido al mal estado de las vías).

Construcciones para la minería (demanda alta en el carbón).

Servicio de almacenamiento y de carga.

Servicios de contabilidad.

Se observa que los encadenamientos estudiados son principalmente de servicios, por lo que desde la UPME se está realizando el esfuerzo para incluir también a bienes, específicamente aquellos de alta rotación en la minería como son: el equipamiento uniformes, guantes, botas, comidas y bebidas. Sin embargo la industria

minera no revela en que cantidades y calidades necesita dichos productos para poder juntar de forma eficiente la oferta y demanda.

- En relación al encadenamiento hacia adelante se refiere a las ventas del sector minero a otros sectores, en (¿en qué sectores de la economía se usa algún mineral?). Para ello se especificó por minerales:

Carbón mineral – en la producción de energía eléctrica, coque y semicoque, uso de hierro y acero comunes; cemento, cal y yeso; productos de papel y cartón; azúcar y panela.

Ferróníquel – en la producción de hierro y acero comunes, otros productos metálicos estructurales y a equipos de transporte.

Oro: para el diseño de metales preciosos y metales enchapados.

Cemento, cal y yeso: asociado al sector de construcción, trabajos de reparación, artículos de hormigón, construcción para grande minería, caminos

Hierro y acero comunes: trabajos de reparación y adecuación, Hierro y acero comunes (en este punto se presenta una ambigüedad sin embargo se encuentra definido de esta forma), otros productos metálicos estructurales.

Como parte de la entrevista, se obtuvieron dos documentos: uno sobre la relación de inversión extranjera y total, y otro documento sobre cifras de encadenamientos en la industria minera.

Jorge Forero:

- **¿Cómo es el cálculo de las regalías en el sector minero?**

R: La UPME es la entidad encargada de fijar los costos y precios bases para pagar las regalías. Este precio base multiplicado por un porcentaje (Determinado por la ley según el tipo de mineral se asume que la diferencia en porcentajes se basa en los costos de producción de cada material) y por el volumen de producción, dan como resultado el monto de regalías. En la última resolución quedó establecido el precio base en 109.000 COP/TON.

LA importancia de las regalías radica en que, a falta de un censo directo de la producción, la relación de dinero permite definir los volúmenes de las empresas mineras.

Los RPP (reconocimientos de propiedad privada) - títulos que la nación les dio mucho tiempo y ellos son los dueños del subsuelo- pagan 0.4\$ de impuestos por producir volúmenes altos. Este precio se está reevaluando y se tiene una propuesta para esos títulos al mismo porcentaje de las regalías.

El precio de cada mineral para exportación es del 80% del precio internacional (Precio tomado del London metal Exchange), no es el 100% porque hay costos deducibles como transporte, etc.

Para el **carbón** térmico que se consume en el país se captura información de termoeléctricas (Geselca, Termotasajero,) cementeras, papeleras, ingenios (los que más consumen carbón en el país). Se busca cuál es el valor al que compraron en planta, los valores de transporte (según tabla de fletes oficial definida por el gobierno) y valor de centro de acopio. Se calcula de esta forma el precio en boca de mina y el promedio tomando en cuenta cada empresa es el precio nacional para carbón de consumo interno. Actualmente la producción de este mineral se encuentra cerca de 3mill de toneladas/año.

Para el carbón metalúrgico que se consume en el país se usa diferentes empresas, empresas para procesarlo y producir Coque, por ejemplo. Y se realiza el mismo proceso para calcular precio en boca de mina.

En resumen la metodología utilizada se define como: Establecer quienes absorben el mineral, a como lo compran y cuanto les valió llevarlo hasta la empresa.

Para la fijación de precios de carbones de exportación se utiliza el índice API2 Argus media (precio en Europa) y se le descuenta el costo del flete marítimo por tonelada. El API2 en Europa se encuentra a 11370 BTU/ton, sin embargo en Colombia algunas veces se encuentra por encima de los BTU, entonces se ajusta según la calidad. Para ello se aplica una regla de 3 para el ajuste del precio.

Los precios se calculan trimestralmente en general para la Guajira, El Cesar-descanso, El Cesar-loma y boquerón, El Cesar-la jagua, los carbones del interior (Cundinamarca, Boyacá, Antioquia) y los Santanderes. Es importante resaltar que los deducibles son diferentes para cada región, según los medio de transporte: costo ferroviario, marítimo o terrestre; de aquí que hayan seis precios para carbones de exportación según la región.

Para **minerales no metálicos** se tiene otro criterio, que depende de los costos de producción. Se realiza una encuesta en la que se reporta los volúmenes de producción y el costo, para calcular costos desagregados, validados por revisor fiscal. Se tienen cerca de 100 encuestas.

El **Níquel**- se liquida de forma provisional, es calculado por la agencia según está definido en los contratos mineros.

Rubén Darío Chanci

- ¿cómo es el proceso de producción, o el comportamiento de la producción?

Depende de cómo se proyecte la mina. Por lo general se hacen accesos para la mina en donde la producción es muy baja (a veces es roca, no manto), cuándo se llega al manto la producción alcanza un máximo de

explotación, llega a un periodo de máxima explotación en donde se mantiene por un tiempo y luego comienza a decaer.

Los proyectos organizados suele tener una vida útil de aproximadamente 20 años, pero en promedio los proyectos pequeños o informales son 5 años de explotación porque no se conoce el depósito. No profundizan mucho, explotan lo que les quede más fácil y luego abandonan.

Los ilegales hacen pequeñas inversiones y explotan todo lo que puedan antes de que llegue el estado. No les importa el impacto ambiental (por lo que es mucho mayor al no haber trabajos de recuperación) y dejan la reserva abandonada sub utilizada. Esta reserva es más difícil y costosa de explotar luego.

- **¿Qué diferencias existen entre minas a cielo abierto y minas subterráneas?**

Las minas de cielo abierto de roca dura son minas grandes (excepto aluvial) tienen impacto fuerte pero hacen un proceso de cierre adecuado. Los principales efectos de las minas a cielo abierto son: la Remoción de capa, la Contaminación de aguas por sólidos en suspensión asociados al estéril, especialmente en minas aluviales.

Las minas subterráneas tienen menos impacto pero como hay tantas ilegales no se cierran adecuadamente y resulta siendo grande la afectación de las zonas.

En relación a la industria del oro, las minas ilegales usan de forma excesiva mercurio en procesos de concentración. En minería subterránea la principal contaminación es en el agua pero de forma más moderada, no tiene tantos sedimentos pero puede haber filtraciones de metales disueltos que cambia condiciones químicas a fuentes hídricas.

- **¿Qué diferencias hay entre legalidad y formalidad en la minería?**

Illegal: Si no tiene título minero. Según código de minas.

Los mineros tradicionales se volvieron ilegales porque llevan muchos años explotando pero no tienen título minero. El gobierno ha hecho trabajos para darles título a esas personas pero el porcentaje de legalización ha sido muy bajo.

Minería por grupos armados de la ley (Bacrim y guerrilla) principalmente en explotaciones de oro (Antioquia, sur de Bolívar, chocó, cauca).Primero cobraban vacunas pero desde 2007-2008 se volvieron operadores de minas.

- **¿Se conocen cifras de minería ilegal?**

Es del orden del 63% en todos los minerales. Censo del 2011. La mayor ilegalidad está en Oro y materiales de construcción. En carbón hay pero es menor. El % debe ser mayor porque no se hizo censo en todo el país, por ejemplo en Nariño en donde hay mucha ilegalidad.

No se tienen registros del valor de producción ilegal.

- **¿Qué se hace con el ilegal?**

Normalmente el Oro se exporta, porque en el momento de exportar no preguntan de dónde viene. Las 55 toneladas incluyen todo porque se exporta y no tiene certificado de origen.

El que reporta que si se pagó regalías es el comercializador.

Todavía no está reglamentado que se certifique origen. Solo se pide que se paguen regalías.

RUCOM – registro único de comercializadores mineros. Todo el que compre o venda debe estar registrado y debe estar asociado a un título minero. Para todos los minerales. Entrará a funcionar en 2015 todos tendrán que estar inscritos. Sin diferencia entre grandes y pequeños.

- **¿Cómo ve los procesos de fiscalización/formalización?**

El principal problema es que se desconoce mucho y no se ha caracterizada la minería ilegal. El estado no sabe a quién se tiene que legalizar y los requisitos muchas veces son “imposibles” de cumplir para un minero tradicional. No se sabe que tan viejo es el minero.

La minería a pequeña escala no es viable bajo las condiciones de legalidad actuales.

Soraya Vargas

- **¿Cómo se pueden cuantificar los impactos ambientales y sociales?, ¿Qué tipo de indicadores se pueden usar en el modelo?**

R:

Empleo e ingresos reales y esperados. Normalmente las poblaciones esperan más empleos y más ingresos de los que se generan, o que se perciben.

Compras. Las poblaciones generalmente no tienen la capacidad para satisfacer toda la demanda de suministros, alimentos, etc., por lo que las firmas optan por traer de otros lugares.

Mano de obra calificada en las regiones. No hay mano de obra calificada en las regiones mineras, por lo que las empresas la traen de otros lugares.

Socialización. No hay diálogos con la comunidad para informar sobre efectos, localización, generación de empleo, ingresos, mitigación de impactos.

Confianza. Las poblaciones tienen el prejuicio de que la información que se les entrega no es completa o no es cierta.

Desinformación. Hay grupos ambientales extremistas que generan desinformación, especialmente en temas de contaminación de agua.

Contaminación de agua real y esperada: Hay mucho consumo de agua por parte de las minas y en algunas ocasiones hay contaminación de acuíferos.

Dinero destinado a la población.

Relación costo total/beneficio total. El modelo mental de las poblaciones analiza los costos totales de la minería pero no considera los beneficios totales.

- **¿Qué posición tienen las regiones mineras frente a la ilegalidad vs legalidad?**

R: Hay estudios que muestran que los grupos ilegales llegan a las regiones mineras y causan efectos negativos en la población, como desplazamiento, reclutamiento de menores y sometimiento de la población.

Existen muchos parámetros para ser formal, que generalmente los mineros tradicionales no pueden cumplir, por lo que caen en ilegalidad.

Las comunidades rechazan a las multinacionales con protestas. Cuando la multinacional desiste y se retira de la región, los grupos ilegales o entran a explotar el recurso.

Anexo 2 – Capacitaciones en Dinámica de Sistemas y sesiones de modelamiento

En este anexo se presentan las actas de capacitaciones y reuniones entre el equipo de trabajo UNAL-UPME. Durante estas sesiones se desarrolló el modelo descrito en el capítulo 5.

A2.1 Capacitaciones en dinámica de sistemas

A continuación se presentan los programas de capacitaciones en Dinámica de Sistemas dictados por la Universidad Nacional, y dirigidas a dos funcionarias de la UPME, Lady Castellanos Niño y Luz Mireya Gómez. El objetivo de estas capacitaciones es realizar una transferencia de conocimiento, de tal forma que la UPME adquiera la capacidad de modificar y actualizar el modelo en desarrollo, así como desarrollar nuevos modelos dinámicos en el futuro.

Las capacitaciones se dictaron en cuatro sesiones de un día, como se muestra a continuación:

DÍA 1: Martes 9 de septiembre					
Hora	Duración (h)	Tema	Actividad	Material*	Responsable
08:00 a. m.					
10:00 a. m.	1	El proceso de modelamiento: Identificación de problemas en dinámica de sistemas	Clase	ppt	Santiago Arango
11:00 a. m.	1	Ejemplos de identificación de problema en casos de aplicación	Discusión	ppt	Jessica Arias, Juan Felipe Parra
12:00 p. m.	2	Almuerzo			
02:00 p. m.	1	Formulación de diagramas causales	Clase	ppt	Santiago Arango
03:00 p.m.	2	Taller de construcción de diagrama causal de modelo de extracción de gas	Ejercicios en vensim	Software. Instrucciones del taller	Santiago Arango, Jessica Arias, Juan Felipe Parra
4:00 pm	1.5	De diagramas a simulación: Planteamiento de	Clase	Ppt	Santiago Arango

		diagramas de flujos y niveles			
DÍA 2: Miércoles 10 de septiembre					
Hora	Duración (h)	Tema	Actividad	Material*	Responsable
08:00 a. m.	1.5	Taller 1 de niveles y flujos: Modelos básicos e introducción a powersim	Ejercicios en powersim	Software. Instrucciones del taller	Jessica Arias, Juan Felipe Parra
9:30 a.m.	1.5	Taller 2 de niveles y flujos: Aplicación al modelo de gas	Ejercicio en powersim	Software. Instrucciones del taller	Jessica Arias, Juan Felipe Parra
11:00 a. m.	1	Presentación de modo de referencia y diseño del taller para identificación del problema. Reunión con el equipo de trabajo UNAL	Reunión	Ppt. Información histórica. Diseño taller 1	Equipo de trabajo
12:00 p. m.		Almuerzo			
2:00 p. m.	2	Introducción a retardos	Clase	Ppt	Santiago Arango
4:00 p. m.	2	Taller de retardos	Ejercicios en powersim	Software. Instrucciones del taller.	Jessica Arias, Juan Felipe Parra
DÍA 3: Martes 7 de Octubre					
Hora	Duración (h)	Tema	Actividad	Material*	Responsable
08:00 a. m.					
09:00 a. m.	1,5	Taller de retardos	Ejercicios en Powersim	ppt	Jessica Arias, Juan Felipe Parra
10:30 a. m.	1	Funciones no lineales y tabla. Ejemplo de dependencia aleatoria en energía	Clase	ppt Archivo de simulación	Santiago Arango
12:00 p. m.	2	Almuerzo			
02:00 p. m.	2	Discusión de estructura general de modelo del sector minero en Colombia	Discusión	Diagrama causal. Lista de variables	Todos los asistentes
04:00 p.m.	2	Discusión de módulo de producción de modelo del sector minero en Colombia	Discusión	Diagrama causal. Archivo de simulación.	Todos los asistentes
DÍA 4: Miércoles 08 de Octubre					

Hora	Duración (h)	Tema	Actividad	Material*	Responsable
08:00 a. m.	2	Validación de modelos en dinámica de sistemas	Clase	Ppt	Santiago Arango
10:00 a. m.	2	Discusión de módulo macro económico de modelo del sector minero en Colombia	Discusión	Diagrama causal. Archivo de simulación	Todos los asistentes
12:00 p. m.		Almuerzo			
2:00 p. m.	2	Análisis de sensibilidad Optimización	Taller	Software Instrucciones del taller	Jessica Arias, Juan Felipe Parra
4:00 p. m.	2	Discusión de módulo social y ambiental de modelo del sector minero en Colombia	Discusión	Diagrama causal. Archivo de simulación	Todos los asistentes

* Material provisto por el equipo de trabajo UNAL.

Lecturas recomendadas:

Estas lecturas apoyan el desarrollo del curso, se recomienda leer en el orden indicado.

1. Sterman, J. (2008). Risk Communication on Climate: Mental Models and Mass Balance. *SCIENCE MAGAZINE* 332. 532 -533.
2. Arango, S., Prado, J., Dyer, I. (2009). Evaluación de Políticas Públicas para la Reducción de la Criminalidad en Medellín: Una Aproximación con Dinámica de Sistemas. *Ensayos sobre POLÍTICA ECONÓMICA* 27(60). 82-108.
3. Ponzo, R., Dyer, I., Arango, S., & Larsen, E. R. (2011). Regulation and development of the Argentinean gas market. *Energy Policy*, 39(3), 1070–1079. doi:10.1016/j.enpol.2010.11.009
4. Forrester, J W. (1971). Counterintuitive Behavior of Social Systems. *THEORY AND DECISION* 2(2). 109-140.
5. Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183–210. doi:10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4

A2.2 Sesiones de modelamiento

A continuación se presentan las actas de reuniones realizadas entre el equipo de trabajo de la Universidad Nacional y las funcionarias de la UPME a cargo del proyecto. El objetivo de estas sesiones fue desarrollar el modelo en conjunto. Se realizaron 4 sesiones de modelamiento, a continuación se presentan las actas y firma de asistentes a las reuniones.

DÍA 1: Martes 21 de Octubre

Hora	Duración (h)	Tema	Actividad	Material*	Responsable
08:30 a. m.	1.5	Revisión de ecuaciones del módulo de producción. Simulaciones y calibración.	Modelamiento en Powersim	Software	Jessica Arias, Juan Felipe Parra, Carlos Perea
10:00 a. m.	1.5	Revisión de ecuaciones de módulos social y ambiental. Simulaciones y calibración.	Modelamiento en Powersim	Software	Pablo Londoño, Sebastián Bernal.
12:00 p. m.	2	Almuerzo			
02:00 p. m.	1	Simulaciones preliminares de modelo integrado	Modelamiento en Powersim	Software	Jessica Arias, Juan Felipe Parra, Pablo Londoño, Sebastián Bernal.
03:00 p. m.	2	Discusión de resultados preliminares del modelo y ajustes necesarios	Discusión	Software y simulaciones preliminares	Santiago Arango, Carlos Adrián Saldarriaga. Ricardo Smith

DÍA 2: Miércoles 22 de Octubre

Hora	Duración (h)	Tema	Actividad	Material*	Responsable
08:00 a. m.	2	Taller de vectores en Powersim	Taller	Software	Juan Felipe Parra
10:00 a. m.	2	Revisión de modelo	Discusión	Software	Añois Olaya, Patricia Jaramillo.
12:00 p. m.	2	Almuerzo			
2:00 p. m.	1.5	Revisión de detalles del modelo	Discusión	Software	Todos los asistentes
3:30 p. m.	1.5	Reunión con equipo de trabajo. Discusión de taller 2 en Bogotá	Reunión	Programa del taller	Todos los asistentes

Principales conclusiones:

Durante las dos primeras sesiones se propuso modificar las variables de inversión, complementar la atractividad para incluir parámetros como infraestructura, seguridad, etc.

Se acordó utilizar los costos reportados por Wood Macznie para la UPME y utilizar la proyección de precios que realiza la UPME para sus planes minero energéticos.

DÍA 3: Miércoles 12 de noviembre

Hora	Duración (h)	Tema	Actividad	Material*	Responsable
------	--------------	------	-----------	-----------	-------------

08:30 a. m.	1	Resumen y conclusiones de taller 2 en Bogotá.	Presentación y discusión	Ppt con resumen	Santiago Arango / Todo el equipo
09:30 a. m.	1	Revisión de modificaciones a diagramas causales, según discusiones de taller 2 en Bogotá.	Discusión	Ppt con diagramas causales	Todo el equipo
10:30 a. m.	1.5	Revisión de avances en modelo	Modelo en Powersim Discusión	Software	Santiago Arango / Jessica Arias / Todo el equipo
12:00 p. m.	2	Almuerzo			
02:00 p. m.	1.5	Discusión de preguntas y necesidades de información para el modelo	Discusión	Lista de requerimientos	Todo el equipo
03:30 p. m.	1.5	Discusión de escenarios y experimentos de simulación, Planteamiento de estrategias	Discusión	Propuesta de escenarios y estrategias	Todo el equipo
05:00 p. m.	1	Taller: importar y exportar datos powersim-excel	Taller	Ejercicio práctico	Juan Felipe Parra / Jessica Arias

Principales conclusiones:

Durante la tercera sesión de modelamiento se revisaron las versiones finales de los diagramas causales del sistema, se acordó presentar junto con los diagramas una leyenda con el código de colores.

Se revisaron los modelos de carbón térmico y oro. Se llegó a los siguientes acuerdos:

- Utilizar la nomenclatura de reservas definida por Crisco, ya que la UPME está acogiendo a ella.
- Utilizar los valores de reservas probadas reportadas por Wood Mackenzie y utilizar los costos de producción que reporta la misma compañía como referencia para las funciones de costos.
- Agrupar en una sola variable todos los tipos de informalidad.

Se revisó el módulo social y ambiental y las modificaciones al índice de atractividad.

Se discutió sobre los minerales a incluir en el modelo. Se tomó como decisión final que el modelo incluirá:

- Carbón térmico a gran escala, con mercado internacional.
- Carbón térmico a mediana y pequeña escala con mercado nacional e internacional.
- Carbón Metalúrgico con mercado nacional e internacional.
- Oro, formal e informal, con mercado internacional.
- Caliza, con mercado nacional.

Los escenarios se propusieron con base en los descritos en el proyecto Escenarios Mineros para Colombia. Aunque el modelo no busca replicar dichos escenarios, si pueden plantearse tres posibles caminos para el sector según las variables que la UPME no pueden controlar, como precio, desarrollos tecnológicos,

estabilidad política y legislativa, etc. Los escenarios propuestos y las variables involucradas son: Precio, tasas de contaminación, productividad, componente de seguridad en atractividad, componente de infraestructura en atractividad, componente de estabilidad jurídica en atractividad.

Las estrategias a modelar que se proponen son:

- Encadenamientos productivos: Incluir una demanda adicional de mineral que provenga de una industria siderúrgica, industrialización del oro (cadena de valor y joyerías), y aumento de centrales térmicas en el país. Estas industrias también adicionan nuevos empleos indirectos al sector.
- Incentivos tributarios: Disminuir impuestos y regalías para aumentar la atractividad del país.
- Efectividad de planes de formalización y legalización: Aumento en la tasa de formalizados y legalizados, que disminuirá a su vez la cantidad de unidades de producción minera informal.
- Mejoras en capacidad de fiscalización: Se mejora el porcentaje de recaudo de regalías e impuestos.
- Mejoras en conocimiento geológico: Mejoras en atractividad y aumento de tasa de descubrimiento de reservas.
- Subastas de títulos mineros: Está en discusión la posibilidad de implementación dentro del modelo. Para esto, se estudiará la documentación existente, suministrada por la UPME

DÍA 4: Miércoles 3 de diciembre					
Hora	Duración (h)	Tema	Actividad	Material*	Responsable
08:30 a. m.	2	Presentación de modelo final de carbón y oro	Presentación y discusión	Modelo en powersim	Santiago Arango / Todo el equipo
10:30 a. m.	1.5	Presentación de versión final de escenarios a simular	Presentación y discusión	Ppt con escenarios y modelo en powersim	Santiago Arango/ Todo el equipo
12:00 p. m.	2	Almuerzo			
02:00 p. m.	1.5	Presentación de primera versión de estrategias	Presentación y discusión	Ppt	Todo el equipo
03:30 p. m.	1.5	Reunión de aspectos administrativos	Reunión		Todo el equipo

Anexo 3 – Validación del modelo

A3.1 Taller de validación de la estructura

Agenda del taller:

Fecha: Oct 27 - 28 /2014

Lugar: Bogotá, Instalaciones de la UPME

Objetivo: Presentar, discutir, y validar thla estructura del modelo del sector minero en Colombia.

	Hora	Actividad	Responsable
Día 1: Taller	8:00 – 10:00	Revisión de la estructura general del modelo - Presentation de diagrama causal - Discusión	Santiago Arango Todos los participantes
	10:00 – 10:15	Receso	
	10:15 – 12:15	Revisión del módulo de producción - Presentación de diagrama causal y diagrama de niveles y flujos - Discusión	Santiago Arango Todos los participantes
	12:15– 14:00	Receso de almuerzo	
	14:00 – 15:00	Revisión de módulo social y ambiental - Presentación de diagrama causal y diagrama de niveles y flujos - Discusión	Santiago Arango Todos los participantes
	15:00 – 18:00	Discusión de detalles del modelo	Todos los participantes
Día 2: Conferencia	10:00 – 12:00	Conferencia: Modelamiento en la planeación minero energética	Erik Larsen

Acta de resultados y conclusiones:

Durante la primera sesión se realizó una discusión semiestructurada del diagrama general del modelo, donde el equipo de trabajo UNAL presentó los avances y los asistentes al taller realizaron preguntas durante la presentación. Las inquietudes y discusiones que se presentaron durante esta sesión fueron:

- ¿Cómo se incluye la investigación y transferencia tecnológica dentro del modelo?

R//: El factor tecnológico se encuentra incluido en la competitividad. En el modelo se tienen parámetros relacionados con las tecnologías utilizadas (como factores exógenos) que se podrán variar según diferentes escenarios. También se ve la diferencia tecnológica en aspectos como la contaminación, la cantidad de mano de obra necesaria y el uso de recursos.

Se acuerda la inclusión de escenario de mejoras tecnológicas dentro del modelo.

- ¿Se incluye en el modelo el papel de la academia y la investigación?

R//: Es necesario verlos como factores exógenos y enfocarse en las variables que realmente condicionen el modelo. Variables como personal calificado no es tan relevante porque, de no haber, se trae de otro país. Además el estudio del impacto académico implicaría la creación de otro modelo alejándonos del objetivo principal del modelo.

Se plantea entonces dejarlo como trabajo futuros junto con el estudio detallado de encadenamientos.

- Se hace la aclaración de que el modelo no está diseñado para responder preguntas abiertas; se hace necesario aterrizarlas o volverlas específicas, ponerlas en función de las variables existentes como cambios en tasas o cifras. A través de estos cambios se pueden interpretar los resultados y llegar de nuevo a la pregunta inicial.

- ¿Por qué el diagrama de bloques no incluye el tema regulatorio

R//: Está de forma implícita, puesto que con ella se definen los parámetros, como por ejemplo el estándar de consumo de agua, contaminación permisible, etc. En el financiero están las tasas impositivas. En producción están los programas de productividad.

Se acuerda poner de forma explícita el marco regulatorio dentro del modelo.

- ¿Cómo afecta la fiscalización, la titularización (número de títulos y otorgamientos de estos) y asociatividad en el la producción? por ejemplo, considerar la posibilidad de crear normas de asociatividad para tener UPM más grandes y aumentar la productividad.

R// Por ahora se incluye fiscalización y programas de formalización. Como trabajo futuro existe la posibilidad de incluir titularización y asociatividad.

Se acuerda separar el modelo de oro por titulados y no titulados (informales)

- ¿Qué pasa si se pasa de demanda de títulos a oferta? ¿Si se hacen subastas del título? Dado que en 2015 es la primera subasta.

R// Las subastas pueden tener un efecto en los montos de inversión. Y si bien se planea la primera subasta para el año entrante, aún no ha ocurrido y por tanto no es pertinente incluir en el modelo. Sin embargo se planteará como una estrategia.

Durante la segunda sesión se revisó el diagrama causal de cada módulo y el diagrama detallado. Las discusiones que surgieron son:

- ¿De dónde sale la información que alimenta el modelo?

R// la información se obtiene inicialmente de la UPME, así como de los artículos y fuentes secundarias de información. Hay esfuerzos por recolectar más información. Se hace menester retroalimentar el modelo con futuros estudios. Hay una Diferencia entre no tener el dato y saber cómo funciona.

- ¿Cómo se utiliza la información histórica?

R// se utiliza para calibrar, aunque se tiene el problema por ejemplo de la serie de oro. Vamos a tener que hacer algunas aproximaciones.

- ¿En dónde se refleja la demanda del mineral? Por ejemplo la diferencia entre demanda nacional e internacional. ¿Qué pasa si aumenta y disminuye la demanda local? Esto puede afectar la producción.

R// El precio interno sigue el precio exportación y afecta la producción. La relación no es directa pero hay una tendencia estadística.

Es importante diferenciar entre demanda local y global. Hay dos mercados para carbón, oro y construcción: Mercado interno y mercado internacional. Estos mercados no están relacionados. Esto puede influir en variables como ganancias.

Se plantea separar mercado interno de carbón, sin embargo se define que el modelo está muy jalonado por el carbón de exportación. El consumo interno es muy pequeño.

- ¿Cómo se escogen las ecuaciones del modelo?

R//: Las ecuaciones están basadas en modelos de sistemas similares, validadas con las personas de la UPME.

- ¿En qué parte del modelo está considerada la infraestructura, como puertos, vías, etc.?

R// la infraestructura de la mina se considera en la tasa de desarrollo, la infraestructura a nivel país afecta la atractividad pero está de forma exógena para mirar escenarios.

- ¿Cómo se debe limitar la capacidad de producción? ¿Se debe tomar la Capacidad de producción según la Mina, el transporte o la planta?
R//: El del modelo se considera la mínima restricción. No puede llegar a cero, debido a que hay compromisos locales que no responden tanto al precio, por lo que la producción no cae a cero.

- Es importante incluir tanto el uso de la tierra como la energía, además del agua. Puede ser más conflictivo el uso del suelo.
R// inicialmente se modelará el agua luego se analizará. Puede haber casos particulares por conflictos del suelo, pero generalmente hay área suficiente para no competir, en visión general.

- ¿Cómo incluir los conflictos en PTO por territorio dentro del modelo?
R// El modelo está diseñado para sectores mineros. En este modelo se considera el territorio que se puede explotar.

- Es necesario tener una variable intermedia. El interés es mirar si después de la minería el municipio puede seguir siendo sostenible y no se va a afectar la calidad de vida. Es necesario variable intermedia entre inversión local y conflicto social, que evalúe realmente los efectos (percepción), no solo el dinero invertido. Para esto, se acuerda incluir las necesidades básicas insatisfechas (NBI).

- ¿Cómo se incluye la estabilidad jurídica en la atraktividad?
R// se modela como una variable exógena a través de escenarios

- ¿Se debería incluir una variable sobre la Salud humana? Salud tiene dos referentes, uno asociado a efectos ambientales pero hay otro efecto más directo relacionado con el riesgo laboral y que es muy importante en informalidad. Se afecta la salud de los trabajadores y es una fuente de conflicto social. Ejemplo: efecto de contacto directo con el mineral, como níquel que afecta vías respiratorias, piel, etc.
R// Esta está incluido en la contaminación. Es un efecto, es ineficiente incluirlo de forma separada por cuestiones de parametrización

- ¿Qué parámetros vamos a tomar para medir la contaminación promedio de vertimiento o caudal??
R//Ambos se tienen contemplados, uno corresponde al Flujo y el otro al nivel.

- ¿Cuándo se habla de tecnología se incluye la capacitación? Se debería Separar. La tecnología Tiene capital humano y capital tecnológico.

R//Este se resume en la variable, no es necesario internalizarlo. Se asume que la tecnología actúa según su eficiencia.

- ¿Qué efectos tiene la simplificación en la robustez del modelo?

R// debe haber un Balance entre precisión y el objetivo del modelo. Hay que entender que es lo que se quiere y las limitaciones de información con las que se cuenta.

- ¿Se debe tomar en cuenta el Costo total o costo de desarrollo y operación?

R// Tomar el total. Para la decisión de exploración se debe incluir costos de exploración si es un proyecto minero integrado. Se pueden averiguar la inversión en exploración- Camilo- esta puede alcanzar el 10% del total del proyecto. Pero es una inversión privada principalmente. Y No hay estudio de reservas probadas certificadas.

- Caída histórica de la producción de oro: Remover los dos puntos. Se puede hacer el ajuste

- Nombre de las reservas: normatividad internacional código York (Canadá)

- ¿Tienen los costos informales un costo mayor o menor?

No incurren en tasas como regalías, seguridad social, salarios difusos

La actividad es más costosa

La estructura de costos es parecida pero son diferentes los objetivos.

Aumentar los costos a los informales para obligarlos a hacerlos formales. Es cuestión de

Hacer cumplir la ley. Tener en cuenta el costo de volverse legal

- Diferencia modelo según las escalas:

No se puede definir por producción porque no se puede definir a priori cuanto se va a obtener.

La diferencias entre escalas está en: Tecnología, capital humano, impactos ambientales, rendimiento (hombre/hora), estructura de costos, rentabilidad esperada.