

Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le de crédito al documento y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA
UNIVERSIDAD DE LA SABANA
Chía - Cundinamarca

**ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA
DISTRIBUCIÓN DEL CARBÓN OBTENIDO DE LA ZONA CUNDIBOYACENCE
A PUERTOS MARÍTIMOS EVALUANDO IMPACTOS AMBIENTALES,
SOCIALES Y ECONÓMICOS.**

JORGE ANDRES BAUTISTA ARIAS

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN DISEÑO Y GESTION EN PROCESOS
CHIA
2013**

**ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA
DISTRIBUCIÓN DEL CARBÓN OBTENIDO DE LA ZONA CUNDIBOYACENCE
A PUERTOS MARÍTIMOS EVALUANDO IMPACTOS AMBIENTALES,
SOCIALES Y ECONÓMICOS.**

JORGE ANDRES BAUTISTA ARIAS

**Trabajo de grado para optar por el título de
Magister en diseño y gestión de procesos**

Director: Cesar López

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN DISEÑO Y GESTION EN PROCESOS
CHIA
2014**

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Chía, abril de 2014

AGRADECIMIENTOS

A Jesús, pues es la fuerza que mueve mi vida, el principio y fin de mi existencia y todo lo que he logrado ha sido por EL.

A mi familia, pues su apoyo y amor están en todo momento y siempre me han acompañado.

A Clementina Cueto y Cesar Lopez por su cooperación a lo largo de la maestría, principalmente en la etapa final.

Josué 10: 12-14

¹²Entonces Josué habló a Jehová el día en que Jehová entregó los enemigos delante de los hijos de Israel, y dijo en presencia de los israelitas: Sol, detente en Gabaón; Y tú, luna, en el valle de Ajalón.

¹³Y el sol se detuvo y la luna se paró, Hasta que la gente se hubo vengado de sus enemigos. ¿No está escrito esto en el libro de Jaser? Y el sol se paró en medio del cielo, y no se apresuró a ponerse casi un día entero.

¹⁴Y no hubo día como aquel, ni antes ni después de él, habiendo atendido Jehová a la voz de un hombre; porque Jehová peleaba por Israel.”

Contenido

0.	INTRODUCCION	12
1.	MARCO TEORICO.....	14
1.1	Panorama Mundial.....	14
1.1.1	Reservas.....	14
1.1.2	Extracción.....	15
1.1.3	Demanda global.....	17
1.1.4	Demanda por sectores y precios	19
1.1.5	Proyecciones de consumo de carbón	20
1.2	Objetivos	22
2.	CARACTERIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DEL CARBON EXTRAIDO DESDE EL CENTRO DEL PAIS.....	23
2.1	Reservas	23
2.2	Explotación	24
2.3	Consumo por Actividad Económica.....	25
2.4	Consumo por departamentos	26
2.5	Tipos de carbón	26
2.6	Precios históricos de exportación.....	26
2.7	Caracterización de la cadena de distribución del carbón nacional	27
2.7.1	Actualidad	27
2.7.2	Descripción del transporte terrestre	28
2.7.3	Descripción de transporte fluvial.....	29
2.8	Proyectos para la competitividad del transporte	29
2.8.1	Ferrocarril del Carare.....	29
2.8.2	Ferrocarril del Pacífico.....	32
2.8.3	Recuperación de la navegación del río Magdalena.....	32
2.9	Impactos asociados a la distribución del carbón	33
2.9.1	Impactos sociales.....	33
2.9.2	Impactos económicos.....	36
2.9.3	Aspectos ambientales.....	37
2.10	Proyección de precios de Carbón.....	39

2.10.1 Proyección con precios bajos.....	39
2.10.2 Proyección con precios medios	39
2.10.3 Proyección con precios Altos	39
2.11 Mercado de carbono.	40
3. PLANTEAMIENTO ESTRATEGICO DE LA RED DE DISTRIBUCION DEL CARBON EXTRAIDO DESDE EL CENTRO DEL PAIS HACIA PUERTOS SOBRE EL ATLANTICO Y PACIFICO.....	41
3.1 Supuestos y consideraciones para la modelación	43
3.2 Eslabones de la red de distribución	43
3.3 Formulación de los modelos de optimización para la red de distribución del carbón desde el centro del país.	46
3.3.1 Modelación de la red de distribución con proyecto de infraestructura existentes. 46	
3.3.2 Modelación de la red de distribución eliminando el transporte terrestre en la última etapa.	51
3.4 Experimentación	53
3.4.1 Escenario inicial.....	54
3.4.2 Escenario minimizando la distribución de carbón en transporte terrestre desde centro de acopio secundario hacia puertos.	61
4 CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS	67
Bibliografía.....	69
Anexos	75

Lista de Figuras

Figura 1 Porcentaje de las reservas mundiales de carbón por país en el año 2009.....	14
Figura 2 Porcentaje de las reservas mundiales de carbón por continente en el año 2009 14	
Figura 3 Comparación entre producción de carbón de principales países (Millones de toneladas) y crecimiento económico mundial	16
Figura 4 Comparación entre producción de carbón de principales países (millones de toneladas) y crecimiento económico mundial	17
Figura 5 PIB y Consumo de carbón para China e India desde 1965 a 2005.....	17
Figura 6 Consumo de carbón por sectores de economía	19
Figura 7 Comparación entre precio FOB y consumo mundial desde 1990 a 2011	20
Figura 8 Demanda de carbón por sector hasta el 2030	21
Figura 9 Comparativo entre consumo de carbón para generación de energía entre China y USA.	22
Figura 10 Producción de carbón y porcentaje dentro del PIB.....	24
Figura 11 Producción de carbón por departamento y porcentaje por zona	25
Figura 12 Porcentaje de consumo por departamentos	26
Figura 13 Precios FOB exportación de carbón desde 1984 a 2011	27
Figura 14 Esquema actual de distribución de carbón desde el centro del país	28
Figura 15 Capacidad de cada centro en función del escenario de demanda.....	30
Figura 16 Localización geográfica del ferrocarril del Carare	31
Figura 17 Distancia entre tramos y corredores del ferrocarril del Carare.....	31
Figura 18 Ruta actual y futura del ferrocarril del Pacífico	32
Figura 19 IED VS. TRM.....	33
Figura 20 Evolución balanza comercial 2000-2012	34
Figura 21 Porcentaje de participación minera en el PIB	34
Figura 22 Valor recibido por concepto de regalías por explotación de carbón (Millones COP).....	35
Figura 23 Índice de desarrollo departamental vs. Regalías per capita.....	36
Figura 24 Sectores impactados por cada 100 pesos antes de producción en el sector carbón.....	36
Figura 25 Sectores impactados por cada 100 pesos después de producción en el sector carbón.....	37
Figura 26 Impactos ambientales durante cargue-descargue, transporte e infraestructura	37
Figura 27 Posición geográfica de los centros de acopio primarios	43
Figura 28 Posición geográfica de los centros de acopio primarios y secundarios.	44
Figura 29 Ubicación geográfica de Puertos sobre el Atlántico y Pacífico	44
Figura 30 Tipo de medio de transporte usado entre nodos.....	45
Figura 31 Método de resolución para hallar la red de distribución.....	54
Figura 32 Impactos y medios de transporte usados a lo largo de la red de distribución. ...	55
Figura 33 Flujo del carbón de municipios extractores a centro de acopio primarios.....	55

Figura 34 Emisiones de CO2 generados en el primer eslabón de la red de distribución de carbón en kilotoneladas.	57
Figura 35 Valor de las emisiones de CO2 en el primer eslabón de acuerdo a la cotización del bono de carbono (miles de dolares).	57
Figura 36 Impacto económico por año de la extracción de carbón en 31 sectores de la economía (miles dólares).....	58
Figura 37 Emisiones de CO2 generados en el segundo eslabón de la red de distribución de carbón en kilotoneladas.	58
Figura 38 Valor de las emisiones de CO2 en el segundo eslabón de acuerdo a la cotización del bono de carbono (Miles dólares).	58
Figura 39 Medios de transporte por tipo de carbón usado para suplir la demanda de cada país.	59
Figura 40 Regalías generadas por la extracción de carbón (Miles dólares).....	59
Figura 41 Emisiones de CO2 generados en el tercer eslabón de la red de distribución de carbón en kilotoneladas.	60
Figura 42 Valor de las emisiones de CO2 en el tercer eslabón de acuerdo a la cotización del bono de carbono (Miles dólares).	60
Figura 43 Emisiones de CO2 por escenario y eslabón de la red de distribución.....	61
Figura 44 Emisiones de CO2 generados en el tercer eslabón de la red de distribución de carbón en kilotoneladas.	62
Figura 45 Valor de las emisiones de CO2 en el tercer eslabón de acuerdo a la cotización del bono de carbono (Miles dólares)	62
Figura 46 Regalías generadas por la extracción de carbón (Miles dólares).....	62
Figura 47 Comparativo de emisiones de CO2 y reducción porcentual minimizando transporte terrestre.....	63
Figura 48 Comparativo de valor económico de emisiones de CO2 y reducción porcentual minimizando transporte terrestre.	64
Ilustración 49 Comparativo de la generación de regalías y aumento porcentual eliminando transporte terrestre.....	64
Figura 50 Comparativo de la generación de regalías y aumento porcentual minimizando transporte terrestre.....	65
Figura 51 Porcentaje de uso por medio de transporte en los tres escenarios de demanda	66
Figura 52 Porcentaje de uso por medio de transporte minimizando el terrestre en los tres escenarios de demanda.....	66

Lista de Tablas

Tabla 1 Extracción de carbón durante los últimos años por país (Millones de toneladas).	15
Tabla 2 Extracción por continente (Millones de toneladas)	16
Tabla 3 Crecimientos inter anuales en la extracción de carbón.	16
Tabla 4 Comparación entre crecimiento económico mundial y variación interanual en la extracción de carbón.....	17
Tabla 5 Demanda por país de carbón (Millones de toneladas)	18
Tabla 6 Demanda por continente de carbón (Millones de toneladas).	18
Tabla 7 Comparación entre demanda y extracción global (Millones de toneladas)	19
Tabla 8 Crecimientos inter anuales en la extracción de carbón	19
Tabla 9 Comparación de la demanda mundial de carbón para generación de energía (Millones de toneladas)	21
Tabla 10 Proyecciones de consumo de carbón de acuerdo a crecimiento económico	21
Tabla 11 Reservas de carbón de Colombia.....	23
Tabla 12 Explotación de carbón por departamento (Kilo toneladas)	24
Tabla 13 Volumen transportado de carbón desde 2002 por el río Magdalena	29
Tabla 14 Pago de regalías en el norte y centro del país (Miles de dólares).....	35
Tabla 15 Emisiones durante el proceso de cargue y descargue de carbón	38
Tabla 16 Kg liberados de CO2 durante el transporte	38
Tabla 17 Emisión de partículas de carbón equivalente en CO2.....	38
Tabla 18 Precio de los diferentes tipo de carbón de acuerdo a escenario y año	39
Tabla 19 Proyección del valor de bonos de carbono.....	40
Tabla 20 Municipios productores de carbón en Cundinamarca y Boyacá	43
Tabla 21 Flujo del carbón de municipios extractores a centro de acopio primarios.	56
Tabla 22 Resultado final por cada escenario planteado (Miles dólares).....	61
Tabla 23 Resultado final por cada escenario planteado (Miles dólares).....	63
Tabla 24 Aumento de utilidad para la red de distribución después de la reducción de transporte terrestre.....	67
Tabla 25 Diferencia porcentual para la red de distribución después de la reducción de transporte terrestre.....	67

Análisis multicriterio para la toma de decisiones en la distribución del carbón obtenido de la zona Cundiboyacence a puertos marítimos evaluando Impactos ambientales, sociales y económicos.

RESUMEN

Se muestra en este trabajo el resultado de seleccionar un método multicriterio para generar la red de distribución de carbón desde centro del país hacia puertos marítimos, teniendo en cuenta impactos sociales, ambientales y económicos. Lo anterior realizando una caracterización de la cadena logística a nivel nacional en la actualidad y proyectada en el futuro a partir de tres escenarios de demanda (bajo, medio y alto) para tres tipos de carbón. Estos escenarios mencionados se generan con base en proyecciones acerca del consumo y precio del mineral en el mercado internacional validados en la literatura, teniendo en cuenta que estas proyecciones están en función de crecimiento industrial mundial, fuentes de energía alternativas y oferta del mineral.

0. INTRODUCCION

En la actualidad el negocio de la explotación, distribución y comercialización del carbón es una interesante oportunidad de negocio debido al volumen demandado en el mundo, pero a su vez la rentabilidad depende de variables exógenas. Factores como la fluctuación en el precio del barril de petróleo y disminución de sus reservas, incremento de los precios internacionales del carbón y sus características como fuente de energía, implican que las grandes reservas que posee Colombia puedan ser bien aprovechadas.

Actualmente Colombia posee las mayores reservas de carbón en Latinoamérica y es el quinto exportador de carbón térmico del mundo, pues se tiene amplio conocimiento en la explotación del carbón cerca al océano atlántico, toda vez que allí se encuentran grandes volúmenes. Lo anterior es aprovechado por multinacionales dedicadas a la distribución y comercialización del mineral, además que esta actividad constituye importantes ingresos para la economía colombiana ya que se consolida como el segundo renglón de exportación después del petróleo.

Para el carbón ubicado en el centro del país, se tiene un inmenso potencial ya que en esta zona se encuentran dos tipos del mineral, el térmico y metalúrgico, siendo este último muy apetecido por la industria siderúrgica ya que es indispensable en la producción de acero como componente básico, por lo que su precio generalmente dobla al térmico. Respecto a las reservas, en el departamento de Boyacá se superaría las 867 millones de toneladas y en Cundinamarca las 539, además de estimarse que la mitad de estas reservas corresponden a cada tipo de carbón.

Actualmente con la explotación de carbón en el altiplano cundiboyacense y de Santander se obtienen 6 millones de toneladas al año y con esa tasa de extracción se tardaría 333 años en aprovechar las reservas, motivo por el cual se hace necesario la rápida explotación y distribución. Lo anterior con el objetivo de aprovechar económicamente la oportunidad pues en un futuro el uso del mineral puede reemplazarse por otras fuentes de energía menos contaminantes.

El objetivo de este trabajo es la formulación de estrategias para la toma de decisiones en el proceso de distribución de carbón desde minas ubicadas en los municipios de Cundinamarca y Boyacá hacia puertos marítimos a partir de análisis multicriterio, con el fin de cumplir metas en aspectos ambientales, económicos y sociales. Por medio de programación por metas se podrá realizar la estrategia de distribución del carbón que tengan en cuenta metas a nivel económico, ambiental y social.

En la primera parte del trabajo se hace pone en contexto el panorama mundial del carbón y se indican los objetivos del trabajo. Después se realiza la caracterización de la cadena de suministro del carbón extraído desde el centro del país indicando como está en la actualidad y también los próximos proyectos de infraestructura que se tendrán. Dentro de

la caracterización se incluyen los impactos ambientales, sociales y económicos, así como proyecciones de precios asociados con el estudio de este trabajo.

Posteriormente se explica y realiza la modelación de la red de distribución con la información que se tiene actualmente, que incluye los proyectos de infraestructura hasta el 2028, para después realizar la modelación minimizando el uso del transporte terrestre.

Finalmente se dan las conclusiones de la investigación y resultados, así como futuros trabajos que podrían generarse.

1. MARCO TEORICO

1.1 Panorama Mundial

1.1.1 Reservas.

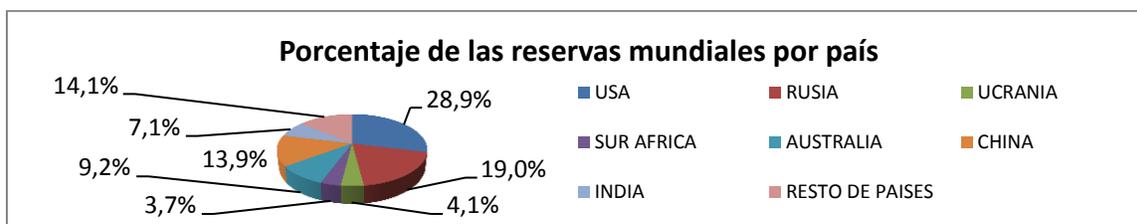
Las reservas se refieren a concentraciones de volumen de un mineral que han sido estudiadas y validadas (WEC, 2013), clasificándose en dos tipos:

- Cantidad probada en el lugar, que es el volumen estudiado y medido cuidadosamente que se encuentra listo para extraer.
- Cantidad recuperable probada, que podría recuperarse en un futuro con la tecnología disponible.

De las reservas probadas a finales del año 2008, los países que poseen mayor volumen de carbón son Estados Unidos, Rusia, Ucrania, Sur África, Australia, China e India equivalentes al 85,9% de las reservas mundiales del mineral.

Sin embargo, se ha evidenciado en los últimos años un agotamiento de las reservas principalmente para China de alrededor de un 1,9% anual, que se explica por las tasas de consumo que ha tenido el país (Energy Watch Group, 2007) y que implica un efecto sobre otros países pues disminuyen su consumo interno con el fin de honrar el volumen de sus exportaciones (Energy watch group, 2009) . La figura 1 muestra el porcentaje en reservas de carbón por país:

Figura 1 Porcentaje de las reservas mundiales de carbón por país en el año 2009



Fuente: Statistical review energy 2009

Respecto a las Reservas por continente, Europa y Eurasia poseen la mayor cantidad seguido por América, Asia, Oceanía y África. La figura 2 muestra la participación porcentual por continente.

Figura 2 Porcentaje de las reservas mundiales de carbón por continente en el año 2009



Fuente: Statistical review energy 2009

1.1.2 Extracción

China encabeza la extracción mundial de carbón y equivale casi a la mitad de lo que se produce a nivel mundial, seguido por Estados Unidos, Australia, India e Indonesia. La extracción por país depende de la demanda del mercado (local o global), los precios a los cuales se negocia y la infraestructura con que se cuenta (Haftendorn, Holz, Hirschhausen, 2012). Citando un ejemplo de los autores, para una planta de energía ubicada en China cuyos proveedores se encuentran uno en el mismo territorio y el otro en Indonesia, la selección del proveedor se hará basado en los costos de extracción y transporte. La tabla 1 muestra la extracción por países.

Tabla 1 Extracción de carbón durante los últimos años por país (Millones de toneladas)

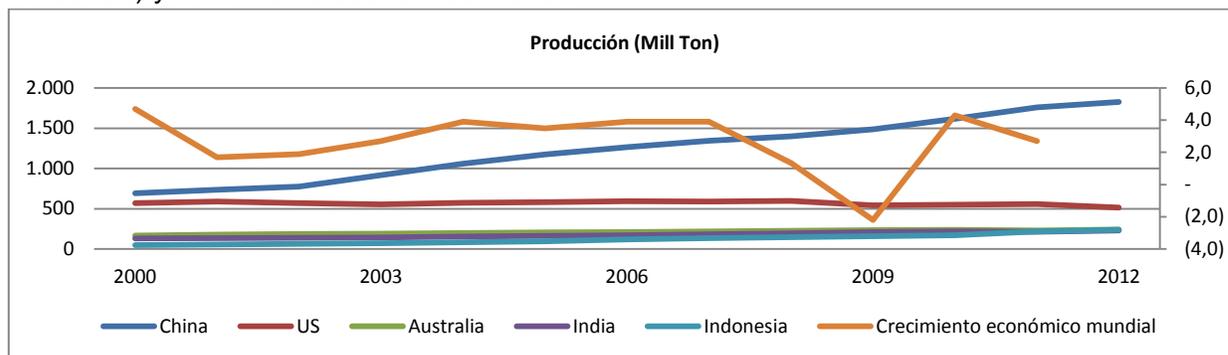
PAIS	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	PROM	%	% Acum
China	917	1.061	1.175	1.264	1.346	1.401	1.487	1.618	1.758	1.825	1.618	47,5	47,5
US	554	572	580	595	588	597	541	551	556	516	552	13,4	60,9
Australia	189	197	206	211	217	224	232	236	231	241	233	6,3	67,1
India	144	156	162	170	181	196	211	218	216	229	214	6,0	73,1
Indonesia	70	81	94	119	133	148	158	169	217	237	186	6,2	79,3
Rusia	127	132	139	145	148	153	142	151	158	168	155	4,4	83,6
Sur África	134	137	138	138	140	142	141	145	142	147	143	3,8	87,5
Polonia	71	70	69	67	62	60	56	55	57	59	58	1,5	89,0
Kazajistán	43	44	44	49	50	57	51	54	56	59	55	1,5	90,5
Colombia	33	35	38	43	45	48	47	48	56	58	51	1,5	92,0
Alemania	54	55	53	50	52	48	44	44	45	46	45	1,2	93,2
Otros	235	240	244	249	249	250	244	254	268	261	255	6,8	100,0
Total	2.573	2.781	2.942	3.101	3.211	3.324	3.354	3.543	3.759	3.845	3.565	100	100,0

Fuente: (British Petroleum, 2013)

De los tres puntos para la producción de un país, dos son variables exógenas pues no dependen propiamente del territorio (demanda y precios). Por lo tanto, la infraestructura afecta directamente la capacidad de extracción del país (Haftendorn, Holz, Hirschhausen, 2010) e influye en los costos FOB, teniendo en cuenta que el termino se refiere a la puesta de producto en el puerto nacional. Otros autores señalan además, que estos costos están impactados por el transporte interno, transbordo, el precio de los combustibles, la capacidad y características portuarias (Zaklan, Cullmann, Neumann, & von Hirschhausen, 2012).

Tomando los principales productores de Carbón, China ha crecido sostenidamente por encima de otras naciones que presentan pequeños descensos. Si se compara con la línea de crecimiento del PIB mundial, China continúa con pendiente positiva incluso en el 2009, año en el cual se presentó la última gran crisis económica que afecto el consumo del mineral. La figura 3 compara los principales productores y el comportamiento del PIB mundial.

Figura 3 Comparación entre producción de carbón de principales países (Millones de toneladas) y crecimiento económico mundial



Fuente: (British Petroleum, 2013)

Pese a que las mayores reservas por continente se encuentran en Europa y Eurasia, Asia encabeza la extracción encabezado por China que genera casi la mitad del volumen a nivel global como lo muestra la tabla 2.

Tabla 2 Extracción por continente (Millones de toneladas)

Continente	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	PROM	%	Acum
Asia-Pacífico	1.365	1.545	1.692	1.824	1.936	2.029	2.152	2.313	2.500	2.607	2.320	67,8	67,8
Norte América	590	611	621	635	629	638	579	592	599	558	593	14,5	82,3
Europa-Eurasia	440	441	441	448	451	458	427	436	456	469	449	12,2	94,5
África	137	141	141	141	142	144	143	148	145	149	146	3,9	98,4
Latinoamérica	40	43	46	51	52	54	52	53	60	62	56	1,6	100
Medio oriente	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0	100
Total	2.573	2.781	2.942	3.101	3.211	3.324	3.354	3.543	3.759	3.845	3.565	100	100

Fuente: (British Petroleum, 2013)

Finalmente, comparando los crecimientos interanuales, la tabla 3 evidencia tasas altas para dos tipos de países: productores que a la vez consumen a la vez como China e India, y exportadores como Indonesia, Colombia y Australia.

Tabla 3 Crecimientos inter anuales en la extracción de carbón.

PAIS	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	PROM
China	15,7%	10,7%	7,6%	6,4%	4,1%	6,1%	8,8%	8,7%	3,8%	-11,4%	3,2%
US	3,4%	1,4%	2,6%	-1,2%	1,5%	-9,4%	1,9%	0,9%	-7,2%	7,0%	-1,4%
Australia	3,9%	4,5%	2,5%	3,0%	3,2%	3,6%	1,7%	-2,2%	4,5%	-3,4%	0,8%
India	7,8%	4,1%	5,0%	6,4%	8,1%	7,8%	3,2%	-0,8%	6,1%	-6,6%	1,9%
Indonesia	15,8%	15,4%	26,9%	12,0%	10,7%	6,6%	7,4%	28,4%	9,3%	-21,7%	6,0%
Rusia	3,6%	5,8%	4,2%	1,9%	3,7%	-7,4%	6,3%	4,6%	6,4%	-8,1%	0,4%
Sur África	2,3%	0,4%	0,2%	1,2%	2,0%	-0,8%	2,6%	-2,2%	3,3%	-2,2%	0,2%
Polonia	-1,2%	-2,6%	-2,5%	-6,9%	-3,0%	-6,8%	-1,6%	2,0%	3,9%	-2,2%	-0,9%
Kazajistán	2,5%	-0,6%	11,3%	1,8%	13,6%	-9,5%	4,9%	4,2%	4,5%	-5,6%	-0,3%
Colombia	7,2%	10,1%	11,1%	6,6%	5,2%	-0,9%	2,1%	15,4%	4,0%	-11,3%	1,9%
Otros	2,3%	1,6%	1,9%	0,1%	0,5%	-2,7%	4,1%	5,7%	-2,6%	-2,2%	0,5%
Total	8,1%	5,8%	5,4%	3,6%	3,5%	0,9%	5,6%	6,1%	2,3%	-7,3%	1,5%

Fuente: (British Petroleum, 2013)

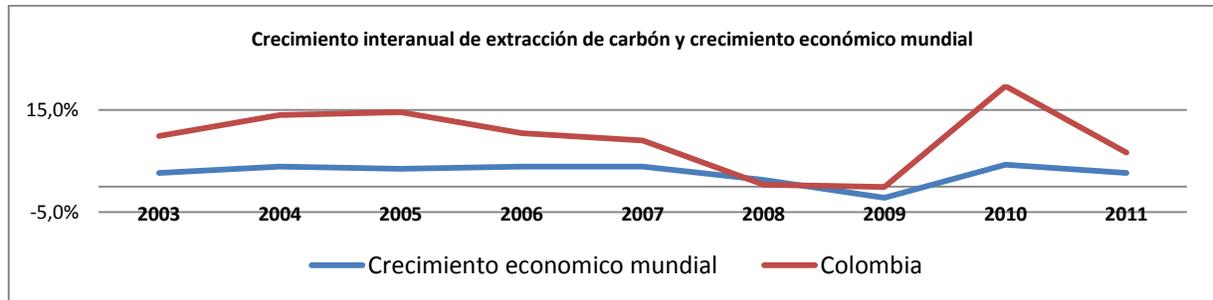
En el caso de Colombia se evidencia una relación entre crecimiento interanual de extracción de carbón y crecimiento del PIB global, mostrando que su producción tiene correlación con las fluctuaciones económicas globales, como los muestran la tabla 4 y la figura 4.

Tabla 4 Comparación entre crecimiento económico mundial y variación interanual en la extracción de carbón

Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Crecimiento económico mundial	2,7%	3,9%	3,5%	3,9%	3,9%	1,3%	-2,2%	4,3%	2,7%
Colombia (<i>Variación en la extracción de carbón</i>)	7,2%	10,1%	11,1%	6,6%	5,2%	-0,9%	2,1%	15,4%	4,0%

Fuente: (SIMCO, 2013) (BANCOMUNDIAL, 2013)

Figura 4 Comparación entre producción de carbón de principales países (millones de toneladas) y crecimiento económico mundial

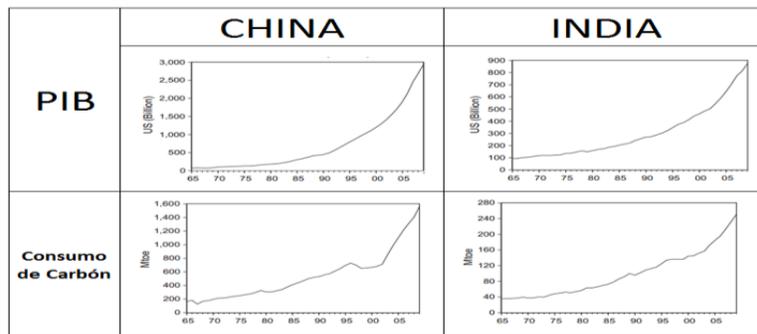


Fuente: (SIMCO, 2013) (BANCOMUNDIAL, 2013)

1.1.3 Demanda global

Durante los últimos años, China e India son los países que más han incrementado el consumo de carbón presentando una correlación positiva respecto al crecimiento económico sostenido en los últimos años (Govindaraju & Foon Tang, 2013). Sin embargo, otros autores consideran que esto podría no mantenerse en el tiempo pues el uso de carbón conlleva asociadas emisiones de CO2 y en un futuro el uso del mineral podría tener políticas restrictivas (Apergis & Payne, 2010). La figura 5 muestra la relación entre crecimiento del PIB y consumo de carbón.

Figura 5 PIB y Consumo de carbón para China e India desde 1965 a 2005



Fuente: Govindaraju & Foon Tang, 2013

Pese a que China e India presentan un incremento sostenido en la demanda del mineral, naciones desarrolladas como Estados Unidos y Japón no sufren grandes modificaciones al alza, de hecho el primero presenta decrecimiento. Lo anterior podría deberse a una estacionalidad dada por la crisis económica, pues durante estos periodos existe una baja en el consumo. Incluso si existieran políticas asociadas a desestimular el uso del mineral migrando a otras fuentes, serían efectos en el corto plazo (Payne, Apergis, & Loomis, 2010) (Jinke, Hualing, & Dianming, 2008). La tabla 5 muestra los principales consumidores de carbón en el mundo.

Tabla 5 Demanda por país de carbón (Millones de toneladas)

AÑO	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	PROM	%	% Acum
China	868	1020	1128	1250	1320	1369	1471	1610	1761	1873	1367	43	43
US	562	566	574	566	573	564	496	524	495	438	536	17	60
India	157	172	184	195	210	230	252	263	271	298	223	7	67
Japón	112	121	121	119	125	129	109	124	118	124	120	4	70
Rusia	104	100	94	97	93	100	92	90	94	94	96	3	73
Sur África	81	85	84	85	90	97	93	90	89	90	89	3	76
Sur Corea	51	53	55	55	60	66	69	76	84	82	65	2	78
Alemania	87	85	82	84	86	80	72	77	76	79	81	3	81
Polonia	58	57	56	58	58	56	52	56	56	54	56	2	82
Otros	529	536	544	566	584	565	534	555	586	598	560	18	100
TOTAL	2610	2795	2923	3075	3200	3256	3239	3464	3629	3730	3192	100	100

Fuente: (British Petroleum, 2013)

Respecto al consumo por continente, Asia quintuplica a Europa y Norteamérica, y su crecimiento ha sido sostenido durante los últimos años. Incluso este continente continuará madurando en comparación a mercados europeos que irán decrecimiento, como efecto que el volumen migrará de una región a otra (Ekawan, Duchêne, & Goetz, 2006). La tabla 6 muestra la demanda por continente y la tabla 7 compara la demanda y extracción global, evidenciando que no se manejan altos inventarios.

Tabla 6 Demanda por continente de carbón (Millones de toneladas).

AÑO	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	PROM	%	% Acum
ASIA	1.353	1.538	1.672	1.817	1.922	1.997	2.108	2.290	2.464	2.609	1977	62	62
EUROPA-EURASIA	537	531	514	531	535	521	471	485	505	517	515	16	78
NORTE AMERICA	602	603	613	604	613	600	528	557	527	468	572	18	96
AFRICA	89	94	93	94	98	105	100	97	97	98	97	3	99
SUR AMERICA	19	20	21	20	22	24	22	25	28	28	23	1	100
MEDIO ORIENTE	9	10	9	0	100								
TOTAL	2610	2795	2923	3075	3200	3256	3239	3464	3629	3730	3192	100	100

Fuente: (British Petroleum, 2013)

Tabla 7 Comparación entre demanda y extracción global (Millones de toneladas)

Continente	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Extracción Total	2573	2781	2942	3101	3211	3324	3354	3543	3759	3845
Demanda Total	2610	2795	2923	3075	3200	3256	3239	3464	3629	3730

Fuente: (British Petroleum, 2013)

Finalmente, la tabla 8 muestra que los más altos crecimientos inter anuales de demanda de carbón son los países de China e India que jalonan el continente asiático.

Tabla 8 Crecimientos inter anuales en la extracción de carbón

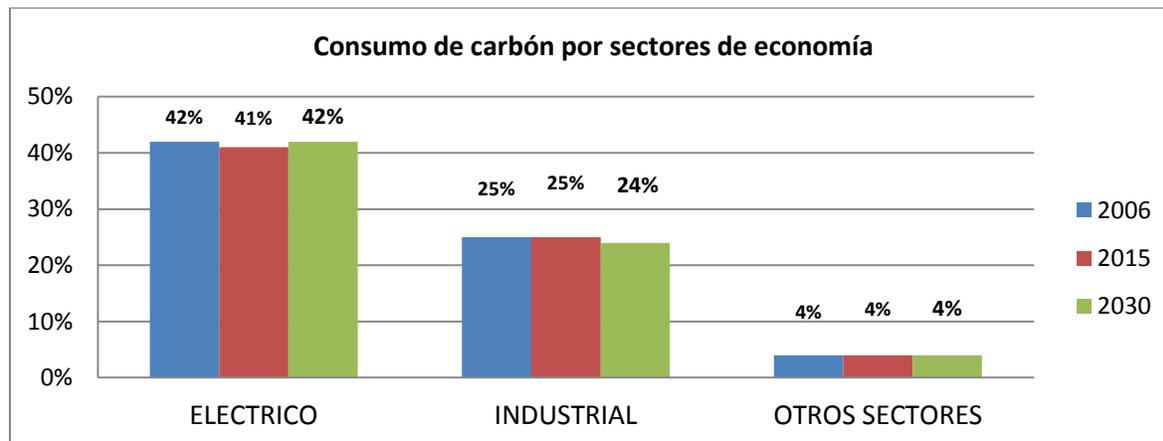
AÑO	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	PROM
China	17%	11%	11%	6%	4%	7%	9%	9%	6%	9%
US	1%	1%	-1%	1%	-2%	-12%	6%	-5%	-12%	-3%
India	10%	7%	6%	8%	10%	9%	4%	3%	10%	7%
Japón	8%	0%	-2%	5%	3%	-15%	14%	-5%	6%	1%
Rusia	-4%	-5%	3%	-3%	7%	-8%	-2%	4%	0%	-1%
Sur África	5%	-1%	1%	5%	8%	-4%	-3%	-1%	1%	1%
Sur Corea	4%	3%	0%	9%	11%	4%	11%	10%	-2%	5%
Alemania	-2%	-4%	2%	3%	-6%	-10%	7%	-1%	4%	-1%
Polonia	-1%	-3%	4%	0%	-3%	-7%	9%	-1%	-4%	-1%
Otros	1%	2%	4%	3%	-3%	-5%	4%	6%	2%	1%
TOTAL	7%	5%	5%	4%	2%	-1%	7%	5%	3%	4%

Fuente: (British Petroleum, 2013)

1.1.4 Demanda por sectores y precios

El principal uso que se le da al carbón es para la generación de energía y este comportamiento continuará para los próximos años pues esta fuente representa un 60% y para usos industriales un 36% (EIA, 2013). La figura 6 muestra los principales sectores que usan carbón.

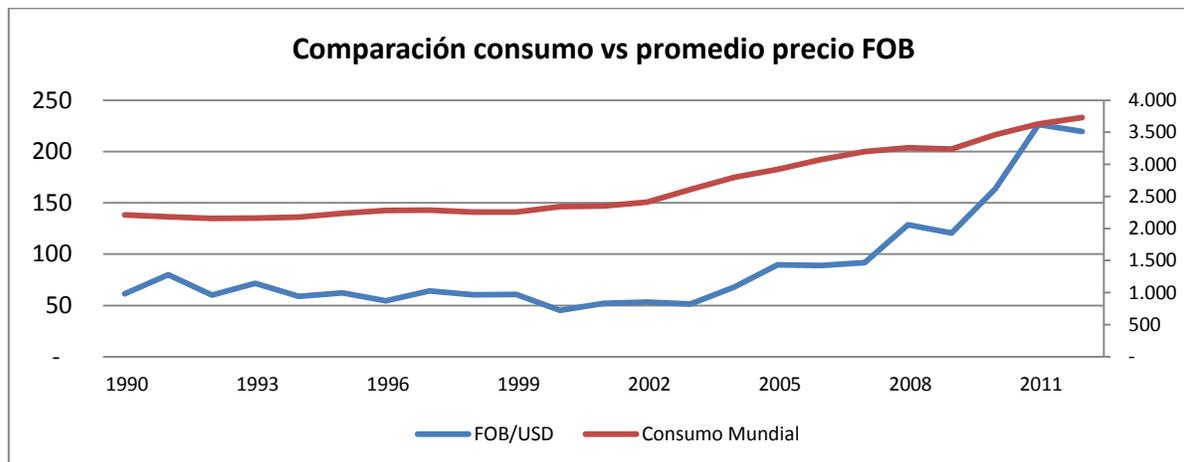
Figura 6 Consumo de carbón por sectores de economía



Fuente: EIA, 2013

Además si se realiza una comparación entre consumo y precio, se evidencia que entre mayor demanda, el precio del mineral aumenta. La figura 7 toma los históricos desde 1990 a 2011 comparando precios vs. Volumen.

Figura 7 Comparación entre precio FOB y consumo mundial desde 1990 a 2011



Fuente: EIA, 2013

1.1.5 Proyecciones de consumo de carbón

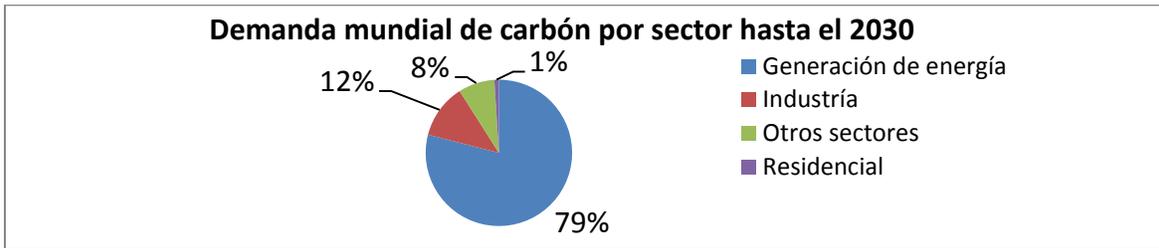
En los próximos 30 años se estima que la demanda global de energía crecerá cerca del 60% y dos tercios de este incremento de la demanda vendrán de países desarrollados, pero muchos de los países pobres continuarán privados del suministro de energía en este período. En el caso del carbón, la demanda crecerá el 20% y de este porcentaje los países no miembros de la OECD (Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo) crecerán entre el 66% y 82%, destacándose China, India e Indonesia. Esto debido a que los países miembros de la OECD tienen políticas para que el uso de energía incluya “descarbonización” de las fuentes (WEO, 2013).

La tasa de electrificación en países desarrollados crecerá de 66% en 2002 a 78% en 2030, pero el número total de personas sin electricidad decrecerá solo de 1.600 millones a 1.400 millones al 2030 debido al crecimiento de la población.

En los últimos años, el uso del carbón ha tenido un crecimiento superior al de cualquier fuente de energía, pues la demanda en China creció el 9%, en India el 7%, en Corea del Sur el 5% y Japón 1% y las expectativas de crecimiento solamente en el continente asiático encabezado por China e India están alrededor del 68%.

Sin embargo, el consumo está en función del abastecimiento que a su vez, depende de la capacidad portuaria y ferroviaria de los grandes exportadores (DECC, 2012). La figura 8 muestra la perspectiva para el uso de carbón hasta el 2030 por sector.

Figura 8 Demanda de carbón por sector hasta el 2030



Fuente: EIA, 2013

En la tabla 9 se muestran las proyecciones de consumo en millones de toneladas para la generación de energía a partir de carbón.

Tabla 9 Comparación de la demanda mundial de carbón para generación de energía (Millones de toneladas)

Economía	2002		2030	
	Millones toneladas.	Porcentaje participación en generación de energía	Millones toneladas.	Porcentaje participación en generación de energía.
OECD Norte América	1051	46	1222	40
OECD Europa	822	29	816	24
OECD Pacífico	364	36	423	29
OECD	2237	38	2461	33
Rusia	220	19	244	15
Otras naciones	249	27	340	18
Economías en transición	469	22	584	16
China	1308	77	2402	72
Asia Oriental	160	28	456	49
Asia del sur	396	60	773	54
Otros	45	10	89	10
África	174	47	264	29
Países en desarrollo	2083	45	3984	47
Total	4791	39	7029	38

Fuente: (WCI, 2005)

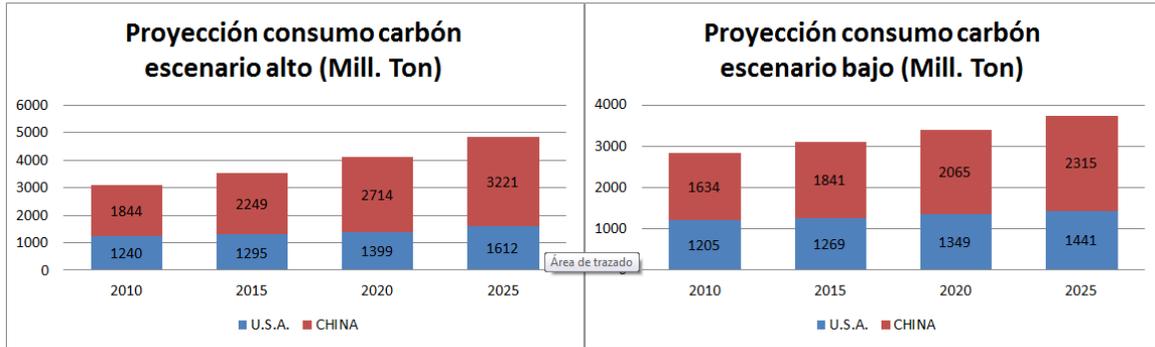
Comparando las proyecciones de las dos economías más grandes del planeta, China seguirá consumiendo más carbón que Estados Unidos y cada vez la diferencia aumentará, como lo evidencia la tabla 10 y figura 9.

Tabla 10 Proyecciones de consumo de carbón de acuerdo a crecimiento económico

Proyecciones de consumo de carbón	País	2,010	2,015	2,020	2,025	Cambio % último período
Alto crecimiento económico	U.S.A.	1,240	1,295	1,399	1,612	15.2%
	CHINA	1,844	2,249	2,714	3,221	18.7%
Bajo crecimiento económico	U.S.A.	1205	1269	1349	1441	6.8%
	CHINA	1634	1841	2065	2315	12.1%

Fuente: (Crompton & Wu, 2005)

Figura 9 Comparativo entre consumo de carbón para generación de energía entre China y USA.



Fuente: (Crompton & Wu, 2005)

1.2 Objetivos

Teniendo en cuenta que la demanda de carbón para los próximos años aumentará y que Colombia tiene suficientes reservas en el centro del país para estar en capacidad de exportar, el objetivo del presente trabajo será formular estrategias para la distribución del carbón desde las minas de Boyacá y Cundinamarca a Puertos marítimos mediante análisis multicriterio para lograr metas en aspectos ambientales, económicos y sociales.

Para alcanzar el objetivo general, se determinaron los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar la red de distribución nacional del carbón extraído desde el centro del país indicando los impactos sociales, ambientales y económicos.
- Formular estrategias y desarrollar un plan estratégico para el sistema de distribución de carbón.
- Experimentación de los escenarios planteados.
- Análisis e interpretación de resultados.
- Formulación de estrategias de distribución de carbón.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DEL CARBÓN EXTRAÍDO DESDE EL CENTRO DEL PAÍS

2.1 Reservas

Las reservas de carbón de Colombia respecto al resto del mundo representan solo el 1%, sin embargo, para la economía colombiana la actividad minera representa un importante porcentaje del PIB. Los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, cuentan con un potencial de más de 2.000 millones que representan el 18,8% de las nacionales como lo muestra la tabla 11.

Tabla 11 Reservas de carbón de Colombia

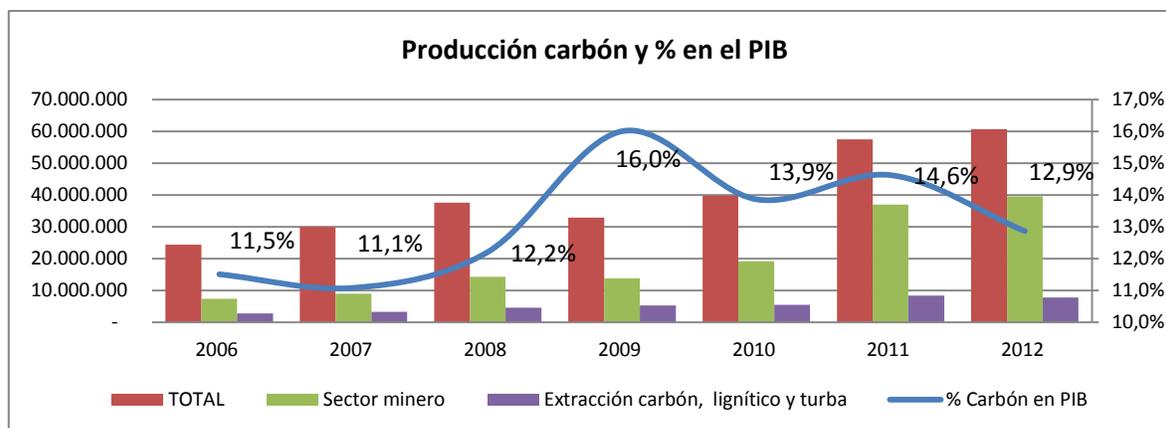
Zona	Recursos más reservas básicas (Mt)			Recursos (Mt)	Potencial (Mt)
	Medidos	Indicados	Inferidos	Hipotéticos	
Guajira	3.933,3	448,86	127,5	27,16	4.536,82
Cesar	2.035,4	1.536,98	1.963,18	993,5	6.529,06
Córdoba-Norte de Antioquia	381	341	0	0	722
Antioquia-Antiguo Caldas	90,06	225,83	132,4	26,45	474,74
Boyacá	170,37	682,62	867,22	0	1.720,21
Cundinamarca	236,23	644,85	539,22	61,77	1.482,07
Norte de Santander	119,69	314,34	360,77	0	794,8
Santander	56,08	258,32	149,24	0	463,64
Valle del Cauca-Cauca	41,45	92,14	97,9	10,98	242,47
TOTAL PAÍS	7.063,58	4.544,94	4.237,43	1.119,86	16.965,81
Terminología					
Reservas medidas: En esta categoría están los recursos comprobados, que tienen el más alto grado de confiabilidad geológica y que han sido evaluados a nivel de apreciación inicial.					
Reservas indicadas: En esta categoría están los volúmenes identificados del yacimiento, que tienen un grado moderado de certeza geológica y que han sido evaluados a nivel de apreciación inicial.					
Reservas inferidas: En esta categoría están los recursos comprobados, que tienen el más alto grado de confiabilidad geológica y que han sido evaluados a nivel de apreciación inicial. Para esta categoría se requiere un conocimiento geológico espacial del yacimiento, delimitado en tres dimensiones por labores subterráneas o por perforación.					
Recursos hipotéticos: Son recursos no descubiertos, con la posibilidad de existencia en áreas geológicas conocidas y en las que ya se han producido otros hallazgos.					

Fuente: (SIMCO, 2013)

2.2 Explotación

Durante los últimos años, el sector minero ha tenido un importante crecimiento y el carbón ha ocupado más del 10% en la línea de exportaciones, consolidándose como uno de los principales productos de la oferta de Colombia hacia el mundo. La figura 10, muestra la producción de carbón y su porcentaje en relación al PIB.

Figura 10 Producción de carbón y porcentaje dentro del PIB.



Fuente: (SIMCO, 2013)

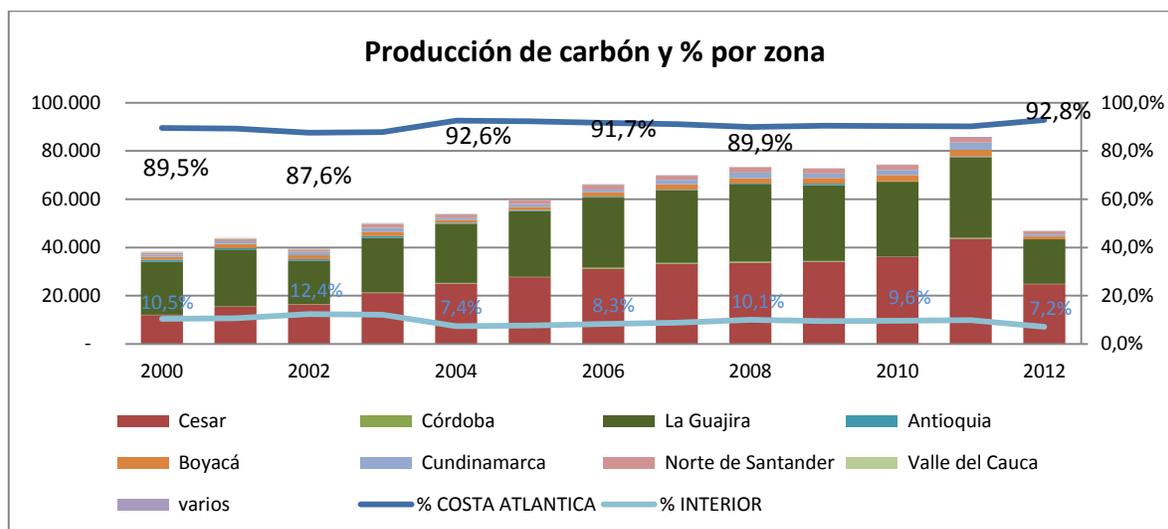
Actualmente la zona norte del país concentra más del 90% de la extracción por dos razones: las reservas y facilidades logísticas. En la tabla 12 y figura 11 se muestra el volumen producido de carbón por departamento.

Tabla 12 Explotación de carbón por departamento (Kilo toneladas)

AÑO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Cesar	12.029	15.385	16.386	21.152	25.028	27.710	31.118	33.187	33.676	34.050	36.016	43.688	24.790
Córdoba	100	141	119	204	351	183	512	481	493	392	100	312	174
La Guajira	22.100	23.676	18.077	22.584	24.547	27.180	29.073	30.069	31.940	31.431	31.098	33.356	18.393
Antioquia	700	648	674	780	352	488	428	230	404	656	149	334	71
Boyacá	1.200	1.765	1.549	1.900	1.204	1.280	1.756	2.275	2.231	2.276	2.676	2.754	1.176
C/marca	970	1.029	1.440	1.500	916	1.176	1.074	1.785	2.406	1.942	2.056	3.063	760
Norte de Santander	760	929	906	1.600	1.283	1.404	1.931	1.691	2.085	1.938	2.117	1.902	1.295
Valle del Cauca	294	242	272	269	179	210	113	50	79	-	-	109	7
Otros	89	96	62	39	27	44	186	134	188	122	137	286	53
ZONA COSTA ATLANTICA	34.229	39.202	34.582	43.940	49.926	55.073	60.704	63.737	66.109	65.873	67.214	77.355	43.357
ZONA INTERIOR	4.013	4.709	4.903	6.088	3.962	4.602	5.488	6.165	7.393	6.934	7.136	8.448	3.362
% COSTA ATLANTICA	89,5%	89,3%	87,6%	87,8%	92,6%	92,3%	91,7%	91,2%	89,9%	90,5%	90,4%	90,2%	92,8%
% INTERIOR	10,5%	10,7%	12,4%	12,2%	7,4%	7,7%	8,3%	8,8%	10,1%	9,5%	9,6%	9,8%	7,2%
TOTAL	38.242	43.911	39.484	50.028	53.888	59.675	66.192	69.902	73.502	72.807	74.350	85.803	46.719

Fuente: (SIMCO, 2013)

Figura 11 Producción de carbón por departamento y porcentaje por zona



Fuente: (SIMCO, 2013)

2.3 Consumo por Actividad Económica

El carbón principalmente se usa como insumo para la generación de energía térmica ya que participa principalmente en los sectores eléctrico y cementero, en menor medida en alimentos, ladrillos, textil, residencial y otros procesos industriales (UTMT, 2008). A continuación se realiza una breve descripción por sector de acuerdo al mercado nacional:

Eléctrico: El sector eléctrico desde 1992 ha tenido un decrecimiento, pues las plantas que se han inaugurado desde este año han sido hidroeléctricas, sin embargo continúa siendo el mayor consumidor del mineral con cerca del 40% para la generación de energía.

Cemento: El 20,2% del consumo nacional de carbón está representado en este sector, por lo que la construcción ya sea de obras civiles o vivienda es un catalizador del consumo del mineral. Sin embargo, la construcción de plantas cementeras ha incrementado la tecnología dual que es complementada con consumo de gas natural.

Ladrillo y Cerámica: Este sector tiene relación con el cementero, pues la producción depende del sector constructor. En la actualidad esta industria representa alrededor del 5% del consumo nacional, principalmente en industrias artesanales.

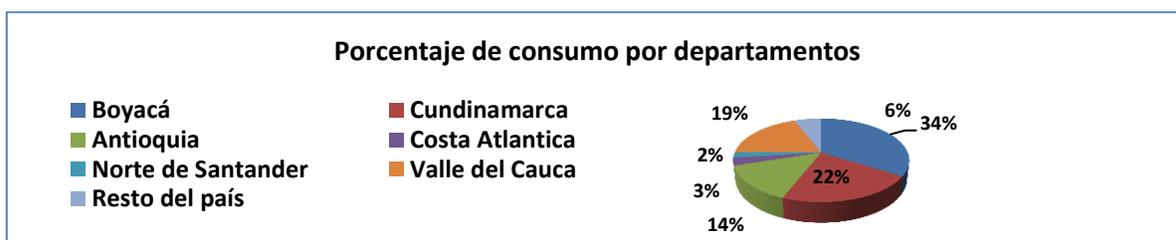
Alimentos y Bebidas: El mineral se usa para la generación de vapor en la producción de calor en hornos, siendo los principales consumidores fábricas cerveceras y de licores. El resto se encuentra disperso en fábricas procesadoras de alimentos, molinos y trapiches paneleros representando alrededor del 5% del consumo.

Textil: La industria textilera ha sido consumidora de carbón para la generación de vapor y representa alrededor del 3%.

2.4 Consumo por departamentos

El consumo interno presenta un incremento en los volúmenes pasando en 1980 de 4.047kt a 5.650 kt en 1993 lo que representa un incremento del 39,6%. Sin embargo, desde este año se presentó un decrecimiento hasta el 2004 que equivale al 43,8%. La figura 11 muestra el porcentaje de consumo por departamentos de Colombia.

Figura 12 Porcentaje de consumo por departamentos



Fuente: (UPME U. , 2006)

2.5 Tipos de carbón

De acuerdo a (UPME U. , 2006), la clasificación de carbones es la siguiente:

Antracita: Carbón con alto contenido de carbono, se usa como combustible en la generación de calor de la industria térmica y siderúrgica.

Hulla Bituminosa: Este carbón posee menor porcentaje de contenido de carbono y poder calorífico y también es conocido como carbón coquizable, se usa para la obtención de acero.

Hulla Sub bituminosa: Con menor contenido de carbono que las hullas bituminosas, se usa para la generación de energía eléctrica.

Turba: Con el menor poder calorífico, se usa para procesos industriales, generación de energía y calor.

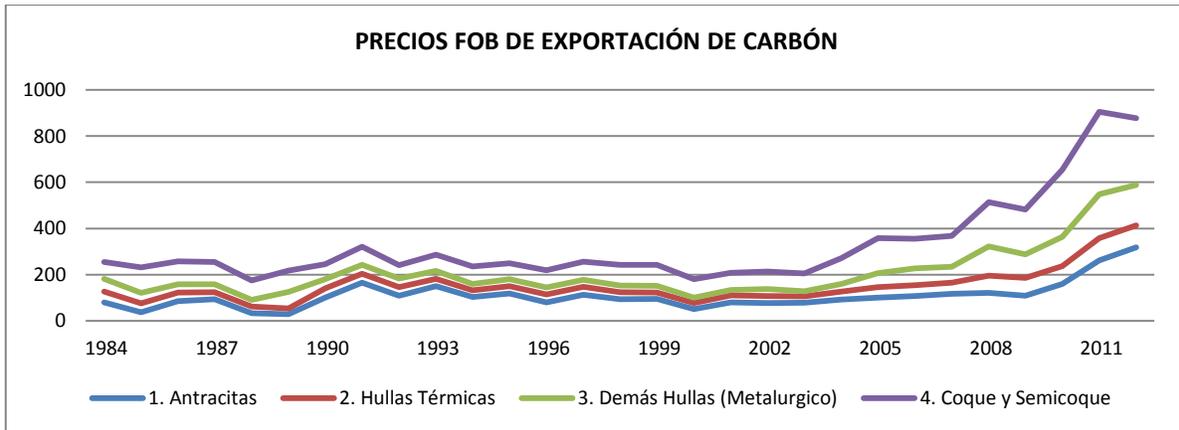
Pese a que no es un carbón en sí, el coque son carbones que al someterse a tratamiento térmico se funden, hinchan, aglomeran y resoldifican generando un residuo carbonoso. Se usa como combustible pues genera energía para la producción de hierro.

2.6 Precios históricos de exportación

Los precios del carbón desde 1990 al 2011 han creció en promedio un 259% para metalúrgico, térmico y coques. Los precios son FOB y no dependen propiamente de los

productores nacionales, sino del mercado de acuerdo al indicador Argus/McCloskey's Coal Price Index Report (UPME, 2012), que compila los precios de transacción commodities. La figura 13 muestra la evolución de precios para los diversos tipos que se exportan.

Figura 13 Precios FOB exportación de carbón desde 1984 a 2011



Fuente: (UPME U. , 2006)

2.7 Caracterización de la cadena de distribución del carbón nacional

2.7.1 Actualidad

La cadena del carbón comienza con la extracción en las minas que pueden ser a cielo abierto o en minas subterráneas, las primeras generalmente se encuentran en el norte del país y las segundas en el interior.

Para las minas desde el interior del país, el grueso del transporte se hace vía terrestre por medio de camiones, pues no hay infraestructura necesaria para transportar por medios más económicos un gran volumen.

Después de ser extraído, se transporta hacia un centro de acopio donde se realiza procesos para su clasificación, almacenamiento, generación de valor, cargue y descargue de vehículos (INCONPLAN, 2011).

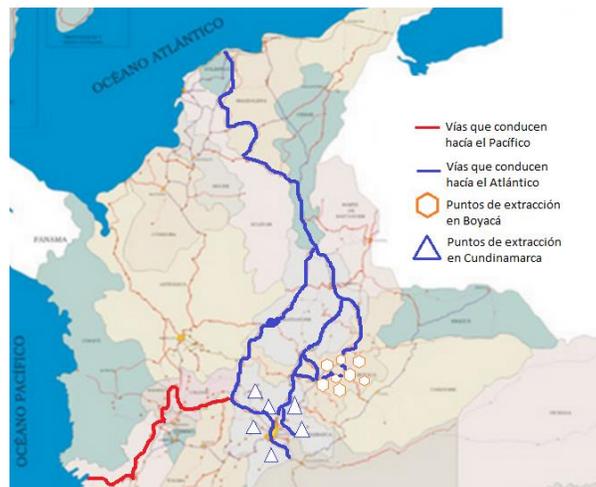
Los patios varían en pequeños que manejan menos de 24.000 toneladas anuales, medianas que van hasta las 800.000 toneladas y grandes que superan a los medianos y por el volumen, cuentan con las mejores especificaciones dentro de sus instalaciones de técnicas y maquinaria.

Dentro del centro de acopio se realiza el lavado del mineral que elimina el lodo y material orgánico, la conminución en el cual se tritura y muele para reducir el tamaño, la clasificación que es la mezcla de materias primas para compensar ciertas características y la concentración que es la separación de componentes (MINMINAS M. M., 2004).

Posteriormente se procede al transporte desde el centro de acopio hacia puertos en vehículos ya sea a granel en vehículos de estacas o mediante “big bags” que son bolsas de gran volumen hacia puertos sobre la costa atlántica o del pacífico.

Teniendo en cuenta que el mayor volumen se transporta vía terrestre y esto para un commodity en Colombia es altamente ineficiente, pues los costos de transporte son de los más elevados en la región, sumado que se debe recorrer grandes distancias y que existe en ciertos momentos especulación en los fletes, que reduce la utilidad sobre el producto. La figura 14 muestra el actual esquema de distribución hasta puertos.

Figura 14 Esquema actual de distribución de carbón desde el centro del país



Fuente: (SIMCO, 2013)

2.7.2 Descripción del transporte terrestre

Las vías del país se dividen en primarias, también conocidas como nacionales que comunican los principales centros de producción y consumo. Secundarias o departamentales comunican cabeceras municipales o a vías primarias y terciarias o veredales que unen Veredas entre si y a las municipales (INVIAS, 2013).

Para transportar el carbón desde las minas se usan vías terciarias donde en la gran mayoría el mantenimiento debe ser realizado por los dueños de estas minas. Teniendo en cuenta el tipo de vías, el acceso es para el tipo de vehículos denominados sencillos o doble troque, pues no soportan de alto tonelaje.

El transporte hacia los centros de acopio que están ubicados en lugares más centrales, se ubica en vías secundarias y en estos puntos se pueden usar vehículos de mayor capacidad porque las vías así lo permiten.

Posteriormente hacia puertos, el transporte se hace por vías primarias en que la velocidad promedio no supera los 50 km/h y que la capacidad de carga útil es de hasta 40 toneladas.

2.7.3 Descripción de transporte fluvial

Pese a que es un método eficiente para el transporte de commodities, el transporte por vía fluvial de carbón se desaceleró desde el año 2004 en Colombia. La operación consistía en trasladar el carbón vía terrestre hacia puertos del Magdalena medio a la orilla del río Magdalena, para posteriormente embarcarlo en barcazas hacia el puerto marítimo de Barranquilla. Sin embargo, en los últimos años el transporte se redujo considerablemente y actualmente se evalúan mecanismos para crear un proyecto en el que se transporten grandes cantidades, pues la navegabilidad e infraestructura actual no lo permite. Las principales razones de la baja navegabilidad son la alta sedimentación y variabilidad en los niveles de fondo. La tabla 13 muestra la evolución del volumen transportado.

Tabla 13 Volumen transportado de carbón desde 2002 por el río Magdalena

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Kton transportadas	421	670	743	149	0,0	11	60	39	0,88	0

Fuente: (SUPERTRANSPORTE, 2013)

2.8 Proyectos para la competitividad del transporte

2.8.1 Ferrocarril del Carare

El proyecto bandera para mejorar la competitividad en el transporte a la producción de carbón es el denominado ferrocarril del Carare que incluye ruta del ferrocarril y centros de acopio con el fin de facilitar el traslado de carbón desde Boyacá y Cundinamarca hacia el atlántico.

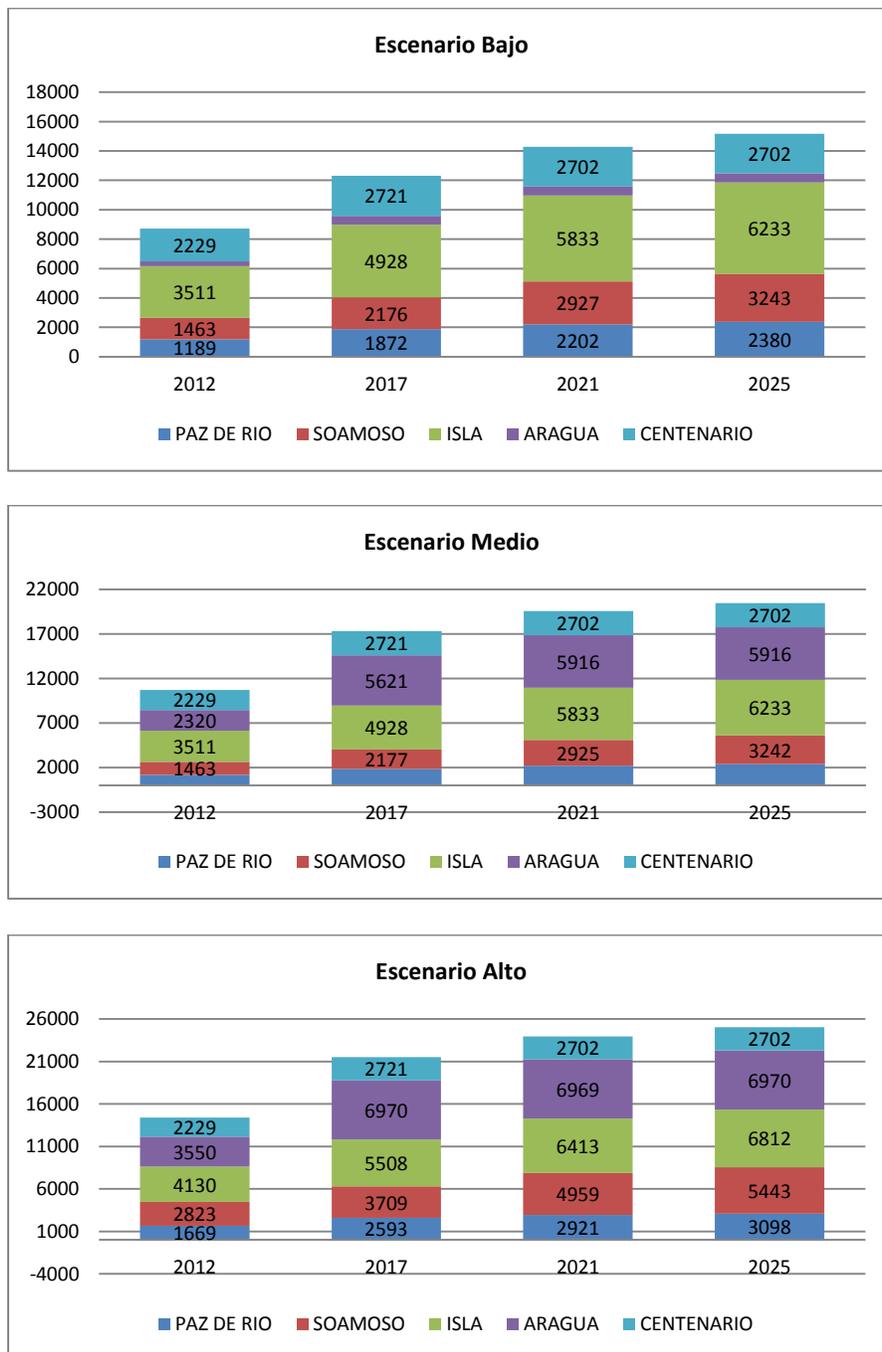
La ruta del ferrocarril comienza en el centro del país de forma que atienda los productores de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca y después pase por Santander para llevar la carga hasta un puerto sobre el Atlántico (Ciénaga en Magdalena). El ferrocarril debe tener centros de acopio ubicados de forma que concentren la mayor cantidad de carbón asociado a su zona de influencia. Estos son:

- Paz de Río (Boyacá)
- La Isla (Cundinamarca)
- Sogamoso (Boyacá)
- Aragua (Santander)
- Centenario (Santander)

Para hacer viable el proyecto, se determinaron escenarios y capacidades de los centros para los próximos años. La figura 15 muestra la capacidad de acopio por cada centro en cada escenario de demanda por los próximos años, la figura 16 la ubicación geográfica y la figura 17 la estructura completa ferroviaria. La capacidad de acopio y transporte estará en función de la demanda de carbón y se podrá ampliar. Pese a que se muestra un importante incremento desde el 2012, el estudio supone dos factores para que se den los

volúmenes indicados: el primero es el uso del 100% de la capacidad instalada de las facilidades logísticas y el segundo que la oferta de carbón del centro del país es absorbida por el mercado internacional.

Figura 15 Capacidad de cada centro en función del escenario de demanda.



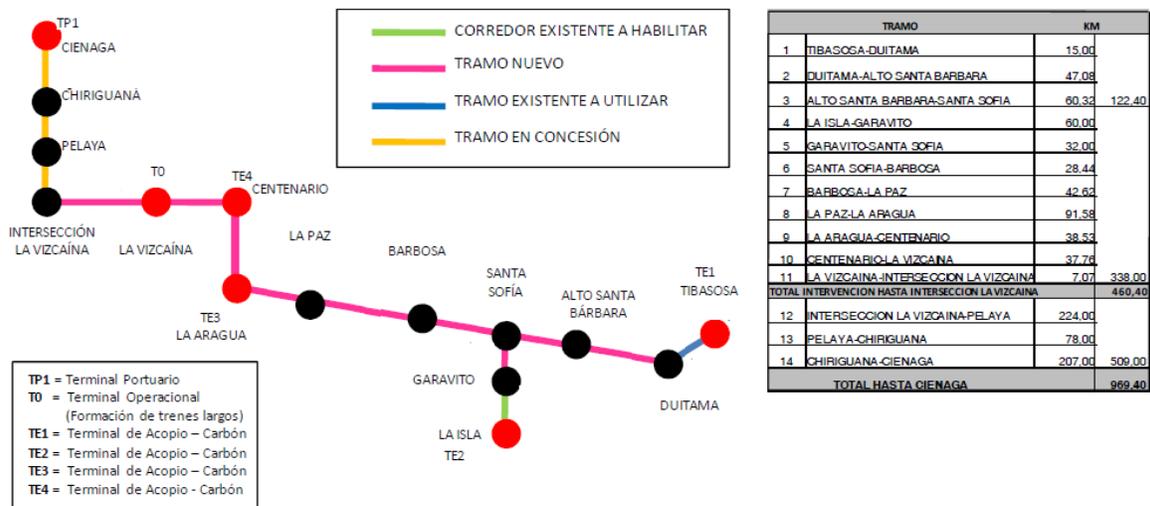
Fuente: (SIMCO, 2013)

Figura 16 Localización geográfica del ferrocarril del Carare



Fuente: (SIMCO, 2013)

Figura 17 Distancia entre tramos y corredores del ferrocarril del Carare



Fuente: (SIMCO, 2013)

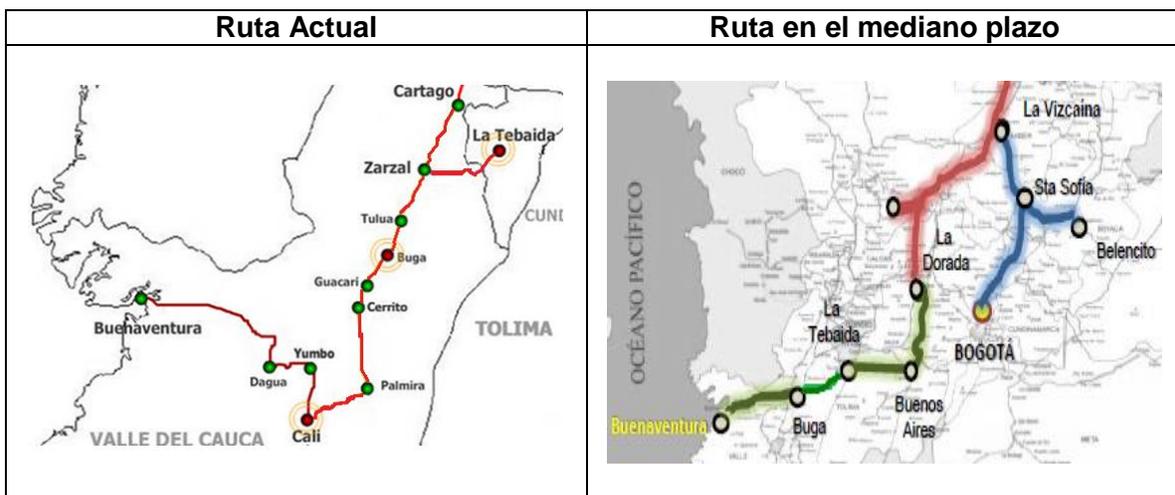
La carga de cada centro de acopio irá hacia la Vizcaína que es el nodo de conexión el tramo en concesión hacia Ciénaga, Magdalena.

2.8.2 Ferrocarril del Pacífico

El Ferrocarril del Pacífico FDP es la conexión entre la carga que transita desde el océano pacífico hacia el interior del país. Este corredor sería la ruta para el carbón exportado hacia toda el Asia y su integración con la red férrea del Carare sería por etapas.

Inicialmente la carga desde el centro del país llegaría vía terrestre hasta un centro de acopio ubicado en Tebaida. En el mediano plazo, existirá una conexión entre el ferrocarril del Carare y el FDP que permitirá que toda la carga de carbón desde el centro hasta el Pacífico se transporte vía férrea. La figura 18 muestra un comparativo entre la ruta actual y proyectada del FDP.

Figura 18 Ruta actual y futura del ferrocarril del Pacífico



Fuente: (AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA, 2013)

Se calcula que la capacidad del ferrocarril del Pacífico será en total de 4.500 kilo toneladas anuales para los próximos años, y como supuesto para el presente trabajo, el 25% de la capacidad estará a disposición para transportar carbón.

2.8.3 Recuperación de la navegación del río Magdalena

Mediante alianzas público-privadas, se busca recuperar el canal navegable del Río Magdalena, pues hasta el 2010 la inversión como porcentaje del PIB para el modo de transporte fluvial era solo del 0.003% (CCI, 2013). Con la restauración de la navegación desde Barrancabermeja, se garantizará el canal navegable incluso en época de lluvias bajas.

Pese a que la capacidad de fluvial máxima potencial del canal podría estar en 550.000 kilo toneladas anuales, no hay evidencia objetiva del tiempo en el cual se implementaría. Por lo anterior, como supuesto del presente estudio se tomará que el 10% del carbón extraído del centro del país podrá moverse por vía fluvial.

2.9 Impactos asociados a la distribución del carbón

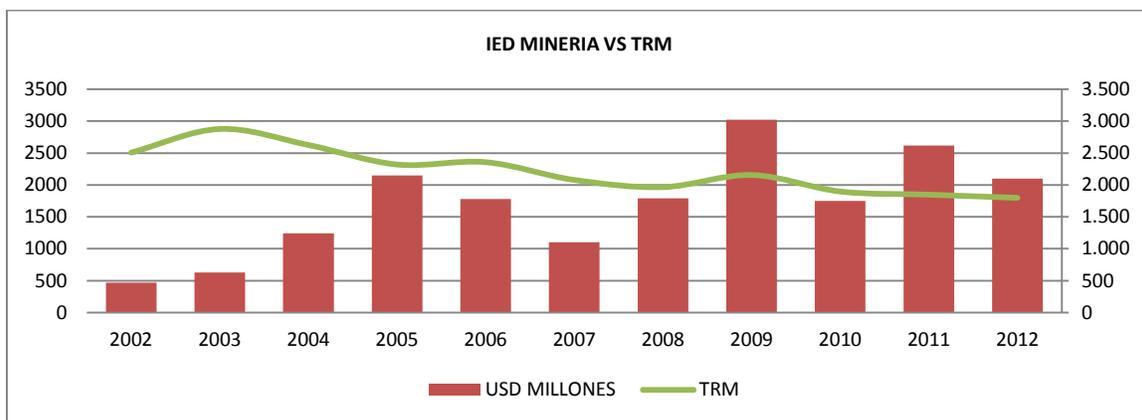
2.9.1 Impactos sociales

La actividad minera es criticada, pues no representa aportes para el desarrollo de la nación y va en contra de otros sectores de la economía, pues puede generar enfermedad holandesa por la llamada maldición de los recursos. Sin embargo, lo anterior depende del manejo que se le dé a los recursos, a la actividad y la regulación dentro de un país (Cardenas & Reina, 2008).

Para Colombia la actividad minera es clave y de vital importancia el carbón, pues ocupa el quinto renglón del PIB junto al petróleo, teniendo en cuenta la creciente demanda que tienen países asiáticos como India y China. Desde el año 2000 es un sector que ha presentado mayor crecimiento frente a otras actividades más usuales como las manufacturas, la agroindustria y energía.

Pese a que la minería es intensiva en capital, genera empleo y actividad económica de alto impacto en varias regiones apartadas de la población (Martínez & Aguilar, 2013), Colombia ha sufrido efectos propios de la dependencia a la comercialización de los commodities como lo son la reducción en tasa de cambio por la abundancia de divisas generando pérdida de competitividad en otros sectores, siendo los principales dolientes los exportadores, teniendo en cuenta que la minería no es un sector aislado y que las variaciones generan impactos (Lederman & Maloney, 2007). La Figura 19 muestra la comparación desde el 2002 hasta el 2012 entre la inversión extranjera directa (IED) asociada al sector minero y la tasa representativa del mercado (TRM).

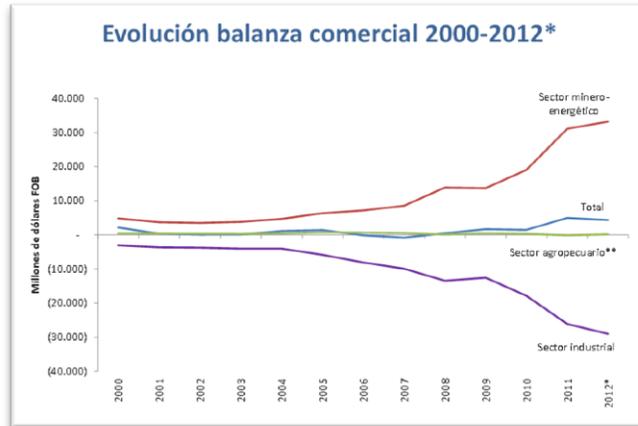
Figura 19 IED VS. TRM



Fuente: (MGE, 2013)

Respecto a la balanza comercial, la figura 20 muestra que en los últimos 12 años se ve un claro descenso en el sector industrial frente al sector minero energético.

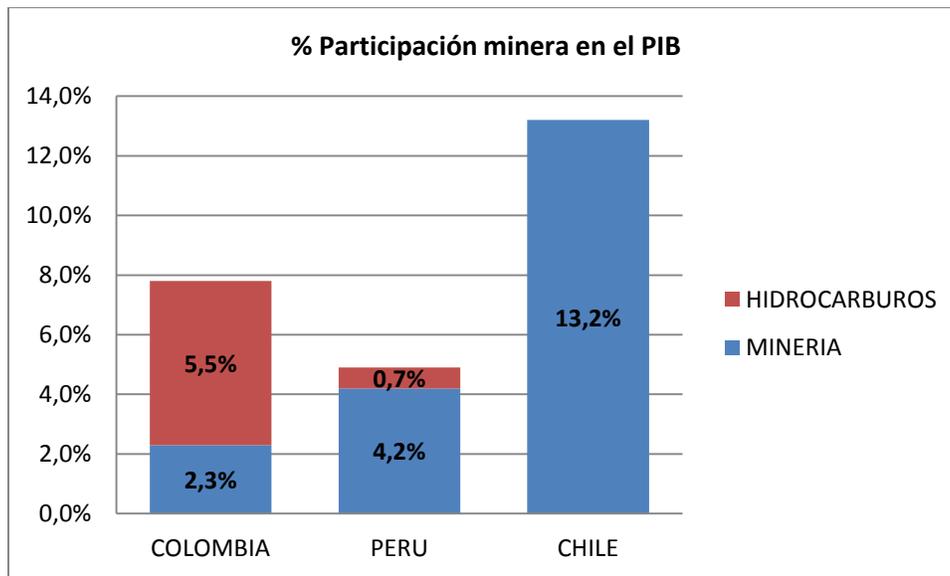
Figura 20 Evolución balanza comercial 2000-2012



Fuente: (Martínez & Aguilar, 2013)

El pensamiento tradicional indica que la minería tiene un impacto nulo sobre la economía, sin embargo existen evidencias de casos exitosos, donde la minería es uno de los motores en la economía de varios países. La figura 21 muestra la comparación del porcentaje del PIB que representa la minería para Colombia, Perú y Chile.

Figura 21 Porcentaje de participación minera en el PIB



Fuente: (Cardenas & Reina, 2008)

De acuerdo a lo anterior, la minería puede tener efectos nocivos tanto positivos, pero para los últimos deben tenerse buenas instituciones que canalicen los beneficios, en el caso de Colombia, a través del buen uso de las regalías (Perry & Olivera, 2009).

Las regalías son el pago que realizan las compañías al estado colombiano por explotar los recursos, en este caso mineros. El estado entrega regalías directas a los entes

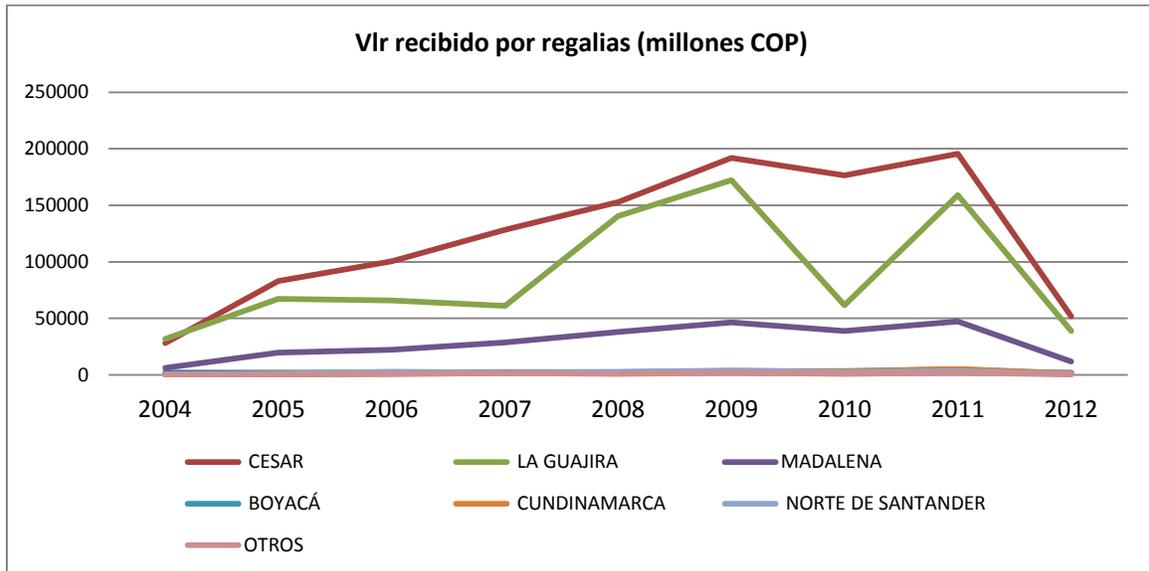
productores (departamentos y municipios) y a los puertos, e indirectas a los entes no productores a través de proyectos definidos como prioritarios en el plan de desarrollo (DNP, 2007). La tabla 14 muestra el pago de regalías por explotación de carbón en la zona norte y centro de Colombia y la figura 22 el valor recibido por departamentos.

Tabla 14 Pago de regalías en el norte y centro del país (Miles de dólares)

Año	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Zona Norte*	36.679	94.611	105.161	121.588	184.329	228.534	154.394	223.706	57.003
Zona Centro*	482	1.913	3.610	4.277	4.436	6.938	5.322	8.361	1.913
% Zona Norte	98,7%	98,0%	96,7%	96,6%	97,6%	97,1%	96,7%	96,4%	96,8%
% Zona Centro	1,3%	2,0%	3,3%	3,4%	2,4%	2,9%	3,3%	3,6%	3,2%

Fuente: (SIMCO, 2013)

Figura 22 Valor recibido por concepto de regalías por explotación de carbón (Millones COP)

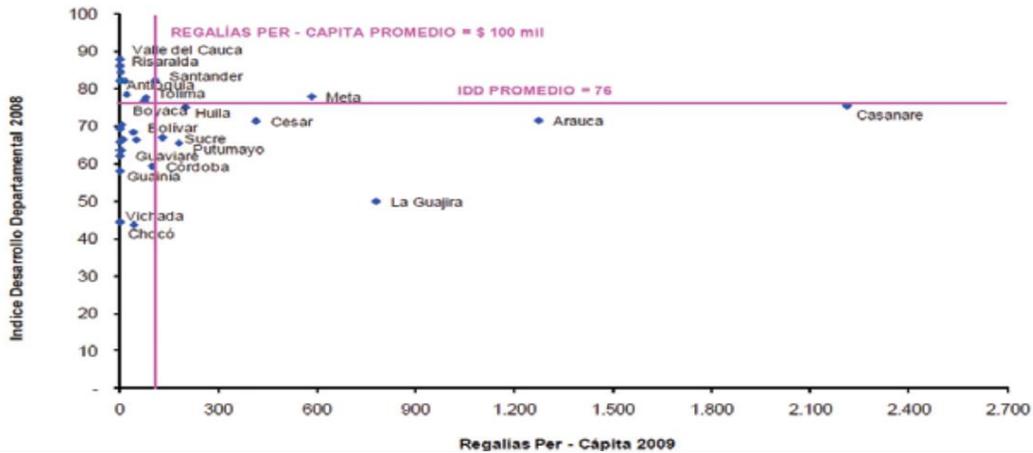


Fuente: (SIMCO, 2013)

Para efectos de este estudio, solamente se tomará la fórmula de asignación del monto de las regalías de la resolución 141 de 2012.

No se tomará el destino de regalías, pues depende del plan de desarrollo de cada ente y como lo muestra figura 23 de índice de desarrollo departamental, el desarrollo de un departamento no depende solo del monto recibido por este concepto.

Figura 23 Índice de desarrollo departamental vs. Regalías per capita



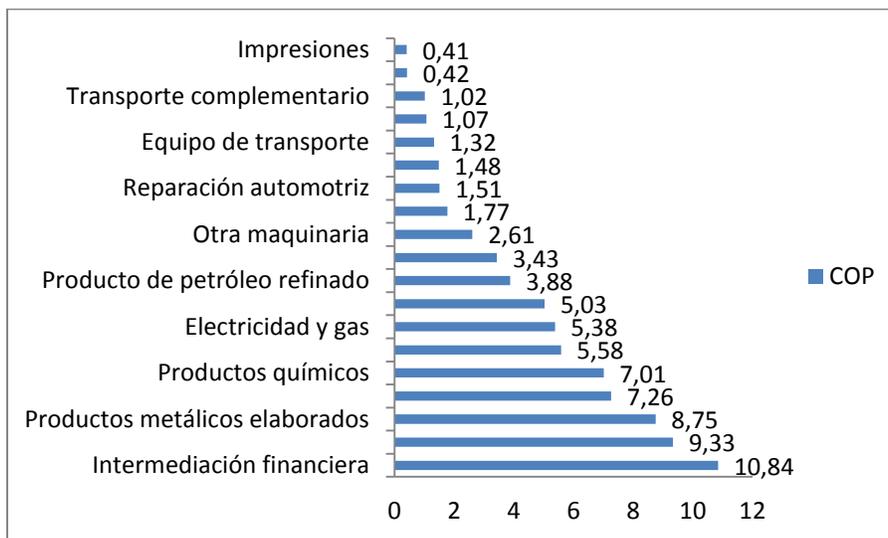
Fuente: (MINMINAS, 2011)

2.9.2 Impactos económicos

Para el sector del carbón particularmente, del valor bruto de producción el 30,6% son compras intermedias, por lo que tiene una gran incidencia en sectores como la demanda de servicios de gas y electricidad, intermediación financiera y transporte (Cardenas & Reina, 2008). Para este trabajo se tomarán los impactos en cada uno de los sectores de la economía mencionados.

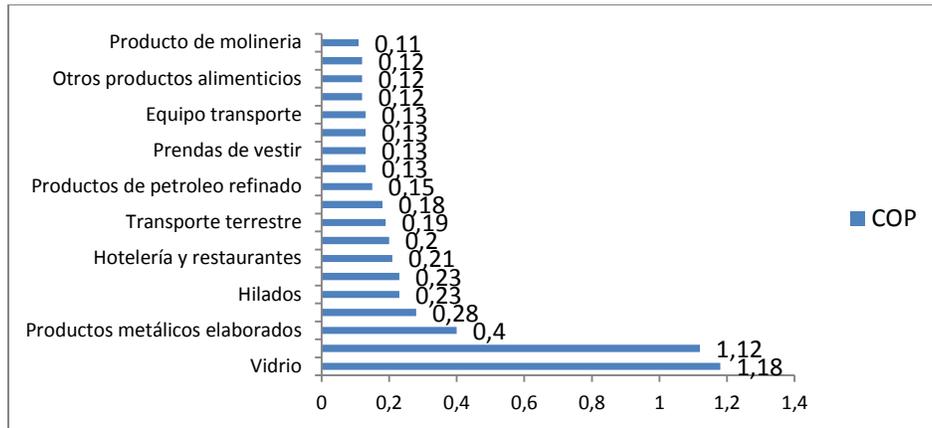
La figuras 24 y 25 muestran el impacto por cada 100 pesos colombianos antes y después de la producción, en varios sectores de la economía.

Figura 24 Sectores impactados por cada 100 pesos antes de producción en el sector carbón



Fuente: (Cardenas & Reina, 2008).

Figura 25 Sectores impactados por cada 100 pesos después de producción en el sector carbón



Fuente: (Cardenas & Reina, 2008).

2.9.3 Aspectos ambientales

La cadena de distribución trae asociada una serie de impactos que afectan de diversas formas el ambiente. Estos tienen repercusión sobre el aire, agua, terreno y otros (MINMINAS M. M., 2004). Para este trabajo y teniendo en cuenta que se deben cuantificar los impactos, se acotó exclusivamente como lo muestra la figura 26, los eslabones del cargue-descargue y transporte.

En los eslabones que se analizarán, se cuantificará exclusivamente los impactos equivalentes en emisiones de CO₂ y a su vez se les cuantificará económicamente, de forma que se tenga una unidad común, como se ha hecho en la cuantificación de impactos sociales y económicos.

Figura 26 Impactos ambientales durante cargue-descargue, transporte e infraestructura



(MINMINAS M. M., 2004)

- Cargue y descargue: Durante las operaciones de cargue y descargue, de acuerdo a los indicadores de sostenibilidad y de desempeño socioambiental para dos grupos de usuarios mineros en Colombia, la tabla 15 muestra los impactos ambientales son los siguientes:

Tabla 15 Emisiones durante el proceso de cargue y descargue de carbón

Proceso	Volumen de carbón liberado	Observaciones	Equivalente en CO2 (kg)
Cargue de vehículos	0,58 kg/ton	Cargue de vehículos y que implican operaciones descapote y carpe de vehículos	0,23
Transporte en volquetas	0,75 kg/ton	Transporte de minas a centros de acopio	0,30
Descargue en tolva	2 kg/ton	Cuando el descargue se realiza al medio de transporte por gravedad.	0,79

Fuente: (Ramírez, 2008)

- Transporte: Durante el transporte existen dos tipos de emisiones. La emisión de gases de efecto invernadero como CO2 son los principales efectos en el eslabón de del transporte, sin embargo, la cantidad varía dependiendo aparte de la distancia, del tipo de transporte usado, pues el volumen de combustible usado difiere teniendo el transporte terrestre la mayor cantidad de emisiones, seguido por el férreo y finalmente el fluvial, pues el último aprovecha la corriente del cuerpo de agua por donde va. La tabla 16 muestra los kg liberados de CO2 por cada tipo de transporte:

Tabla 16 Kg liberados de CO2 durante el transporte

Transporte	KG liberados de CO2
Terrestre	9,64 Ton-Km
Fluvial	43 Ton-Km
Férreo	26,26 Ton-Km

Fuente: (ALAF, 2013)

El segundo tipo es la emisión de partículas durante el traslado del carbón y depende también del tipo de transporte usado. La tabla 17 muestra las emisiones de partículas de carbón, equivalentes en CO2.

Tabla 17 Emisión de partículas de carbón equivalente en CO2

Proceso	Volumen de carbón liberado	Observaciones	Equivalente en CO2 (kg)
Transporte terrestre	0	Se asumirá que durante el transporte, el mineral es empacado en "big bags", que evitará la emisión de partículas.	No aplica.
Transporte fluvial	0,02% de pérdida por viaje de carbón. Es decir 20 kg/ton de carbón transportado.		7,9 kg co2/ton transportada.
Transporte férreo	9,6 gr km/wagon		0,0037 kg CO2-km/wagon

Fuente: (AURIZON, 2013) (EPA, 1978)

2.10 Proyección de precios de Carbón

Actualmente se manejan 3 escenarios en cuanto al precio que pudiera tomar el carbón de acuerdo a la demanda que se pueda llegar a presentar (DECC, 2012). Estos escenarios será la base modelar las estrategias de distribución y se muestran en la tabla 18.

2.10.1 Proyección con precios bajos

Este escenario se daría principalmente por bajo crecimiento económico, que implica una baja demanda y productividad mundial. A partir del año 2020, se estima que el precio por tonelada podría disminuir a menos de USD 100, pues aparte de la baja demanda, se considera también ampliación de la infraestructura que genera menores costos asociados a transporte.

2.10.2 Proyección con precios medios

En este escenario los precios están dados principalmente porque Estados Unidos y Rusia abastecerán al mercado europeo, mientras que Colombia y Sur África lo harán con el asiático. Cabe destacar que en este escenario, cualquier inversión para mejorar el precio marginal del mineral es ignorada.

2.10.3 Proyección con precios Altos

Este escenario se daría por inversión que estaba retrasada, crecimiento económico alto y estrategia de protección a precios de los productores. El escenario también podría darse por una alta demanda mundial, pero a su vez baja productividad e inversión (en la infraestructura para extraer y transportar el mineral). Así mismo, la alta demanda viene de Asia en vez de Europa y una vez más, los grandes proveedores para el continente asiático serán Colombia y Sur África, además de Australia e Indonesia que son los proveedores usuales.

Tabla 18 Precio de los diferentes tipo de carbón de acuerdo a escenario y año

TIPO	Escenario	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020 a 2028
METALURGICO	BAJO	289	277	262	249	237	225	210	198
	MEDIO	314	306	299	294	287	279	272	272
	ALTO	353	356	361	363	366	368	373	375
COQUE	BAJO	289	277	262	249	237	225	210	198
	MEDIO	314	306	299	294	287	279	272	272
	ALTO	353	356	361	363	366	368	373	375
TERMICO	BAJO	150	143	136	129	123	116	109	102
	MEDIO	163	159	155	152	148	145	141	141
	ALTO	183	184	187	188	189	191	193	195

Fuente: (DECC, 2012).

2.11 Mercado de carbono.

Teniendo en cuenta el cambio climático y sus implicaciones, en 1997 en Kyoto, Japón, se adoptó un protocolo para limitar a los países la emisión de gases de efecto invernadero con penalidades a los países que no lo cumplieran (Schlamadinger & Marland, 1998). Dentro de las diversas alternativas para mitigar los efectos, se plantea el mercado de carbono que es un sistema de comercialización de reducción de emisiones, donde una institución puede comprar y vender reducciones de derechos de emisión. Los derechos de emisión se transan en bolsas o con países y su precio depende de diversos factores (Peace & Juliani, 2009). La tabla 19 muestra la proyección de precios para bonos de carbono que se usarán para cuantificar económicamente las emisiones durante la distribución.

Tabla 19 Proyección del valor de bonos de carbono

Escenario	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020 a 2028
ALTO	14	18	20	24	26	27	29	34
MEDIO	14	14	18	18	20	24	23	22
BAJO	14	16	15	14	15	17	16	17

Fuente: (Yunyi Chen, 2012)

3. PLANTEAMIENTO ESTRATEGICO DE LA RED DE DISTRIBUCION DEL CARBON EXTRAIDO DESDE EL CENTRO DEL PAIS HACIA PUERTOS SOBRE EL ATLANTICO Y PACIFICO

A continuación se presenta el planteamiento estratégico de la red de distribución del carbón extraído desde el centro del país hacia puertos sobre el Atlántico y Pacífico. El planteamiento tiene en cuenta la estrategia de distribución hasta el 2028 en 3 medios de transporte, teniendo en cuenta 3 escenarios de demanda por cada tipo de carbón producido en el centro del país transportado cuantificando impactos sociales, económicos y ambientales mediante el uso de programación lineal.

Inicialmente se seleccionará los centros productores de carbón de acuerdo al tipo de carbón y cercanía con los centros de distribución primarios. Posteriormente se suplirá la demanda de los países por tipo de carbón, en un horizonte de tiempo y en tres escenarios diferentes teniendo en cuenta la capacidad de cada medio de transporte desde el centro de acopio secundario hacia puertos marítimos maximizando impactos económicos, ambientales y sociales. Una vez se genere la red de distribución, se maximizará beneficios ambientales y sociales de la distribución de carbón eliminando el transporte terrestre de la red de distribución, reemplazándolo por medios férreo o fluvial.

Para el caso de estudio se aplicará investigación de operaciones pues es ampliamente usada en casos de red de distribución con el fin de optimizar el flujo de recursos y en la literatura se evidencia que el uso de estas técnicas de programación matemática ha aumentado en importancia en los últimos años ya sea a nivel estratégico (largo plazo), táctico (mediano plazo) u operativo (corto plazo) (Bashiri, Hossein , & Jafar , 2012).

La optimización de la red de distribución inicia desde la selección y ubicación de centros de producción y distribución como decisión estratégica encontrándose modelos de enteros lineales mixtos para seleccionar una planta de producción y distribución para satisfacer la demanda del mercado minimizando los costos para cada periodo y tipo de producto (Amiri, 2006), o varias . (Canel, Khumawala, Law, & Loh, 2001). También se encuentran modelos de relajación lineal que tienen en cuenta los diferentes tipos de material y facilidades logísticas minimizando los costos totales de la red (Melo, Nickel, & Saldanha-da-Gama, 2006). En la literatura se hace énfasis principalmente en el eslabón del transporte, pues en este se encuentran los mayores costos a lo largo de la cadena y representan el 64% de los costos totales (Carter & Ferrin, 1995), por lo anterior la optimización y análisis de este eslabón permite la competitividad en cualquier tipo de negocio, especialmente para el transporte de commodities (Pisarki, 2008).

Existen casos donde se integra varias decisiones considerando minimización en costos de transporte de fletes desde centros de producción a distribución (flete in) y fletes desde centros de distribución a cliente (flete out) usando técnicas de optimización no lineal (Tsao & Lu, 2012).

Se encuentra también optimización de la red de distribución cuando esta considera varios periodos de tiempo mediante el desarrollo de un algoritmo bi etapa que incluye multi commodities, multi periodo, multi etapa y asignación de facilidades logísticas: en la primera etapa se aplica la técnica brach and bound para generar las soluciones candidatas para cada periodo y posteriormente programación dinámica para buscar la secuencia óptima de la configuración sobre el horizonte de planeación multi-periodo. (Canel, Khumawala, Law, & Loh, 2001) o mediante programación entera mixta para integrar la red de distribución y posteriormente se usa relajación lagrangiana (Jayaraman & Pirkul, 2001).

Pese a que no está dentro del alcance de este trabajo, también existen modelos que incorporan control de inventario para resolver la distribución multi commodity mediante un modelo de programación no lineal entera mixta minimizando el costo total que incluye costos de locación, inventario y transporte bajo nivel de servicio (Jin, Feng, Li-xin, & Gui-jun, 2009), abastecimiento externo minimizando el costo total que incluye locación, transporte y costos de inventario usando un modelo de programación entera no lineal (Wu & Zhang, 2014).

Cuando existen decisiones multi-objetivo existen procedimientos basados meta heurísticas o técnicas tradicionales: del primero algoritmos genéticos para encontrar el conjunto de soluciones en la red de suministro que consisten en minimizar el costos asociado a la red de distribución y maximizar el servicio al cliente teniendo en cuenta el número de centros de distribución, demanda y restricciones tanto de oferta como producción (Altiparmak, Gen, Lin, & Paksoy, 2006) o algoritmos mediante colonia de hormigas para resolver redes de distribución minimizando el costo total de la operación y lead time para cada producto, considerando selección de proveedores para cada producto que se oferta, plantas productoras y medios de transporte (Moncayo-Martinez & Zhang, 2011).

Del segundo se encuentran en la literatura modelos estocásticos para maximizar la utilidad de la red de distribución y garantizar la satisfacción de la demanda del cliente, minimizando el riesgo financiero, asociado a la colocación de centros de producción, distribución y oferta de materia prima en un horizonte de tiempo (Guillen, Mele, Bagajewicz, Espuña, & Puigjaner, 2005), (Sabri & Beamon, 2000). También mediante el uso de programación lineal entera mixta y método minimax se desarrolla una red de distribución considerando producción, distribución y planeación considerando costos, responsabilidad de los eslabones y nivel de servicio simultáneamente mediante teniendo en cuenta costo total, flujos de material, tiempos asociados y venta perdida (Liu & Papageorgiou, 2013).

3.1 Supuestos y consideraciones para la modelación

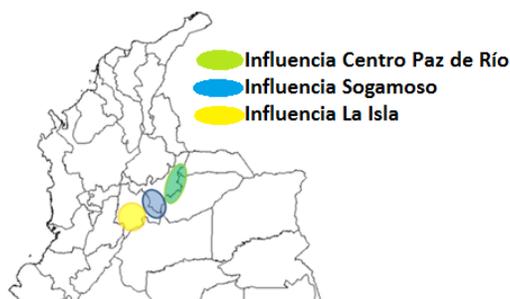
- El modelo no tiene en cuenta la probabilidad de paros, ataques terroristas o cualquier factor que afecte la distribución del mineral en Colombia considerando un período de planeación por años, cuyo horizonte es desde el 2013 hasta 2028.
- El modelo no tiene en cuenta decisiones asociadas al inventario ni de restricciones de capacidad en puertos marítimos.
- El modelo supone una capacidad de transporte de 25% de la capacidad del ferrocarril del pacífico exclusivamente para la movilización de carbón desde el centro del país hacia mercados hacia el pacífico y 10% para transporte fluvial hacia los mercados ubicados sobre el Atlántico (volumen superior a los históricos que se manejan con la actual capacidad de estos sistemas).

3.2 Eslabones de la red de distribución

El planteamiento estratégico incluye el análisis de los eslabones que se encuentran dentro de la distribución (centro de acopio primario y secundario, transporte), para cada año del horizonte de planeación (2.013 a 2.028) y cada escenario de demanda (bajo, medio y alto).

Centros de acopio primarios: Los centros de acopio primario reciben todo el volumen de carbón extraído de diferentes puntos de Boyacá y Cundinamarca que se transporta vía terrestre. La figura 27 muestra la posición geográfica de los tres centros de acopio primarios y su influencia. La tabla 20 los Municipios productores del carbón.

Figura 27 Posición geográfica de los centros de acopio primarios



Fuente: (INCONPLAN, 2011)

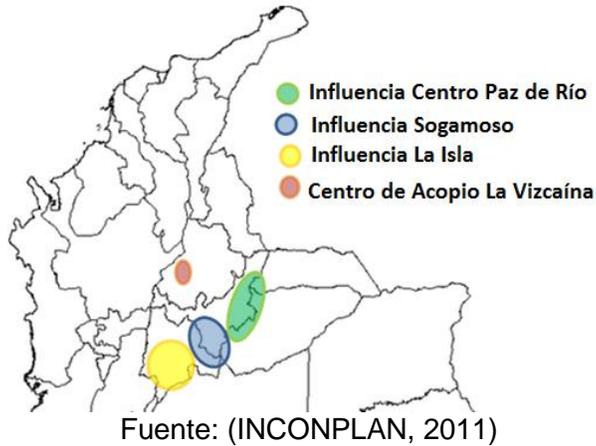
Tabla 20 Municipios productores de carbón en Cundinamarca y Boyacá

TURMEQUÉ	UMBITA	VENTAQUEMADA	CAPARRAPÍ	COGUA	CUCUNUBÁ
GUACHETÁ	GUATAVITA	JERUSALÉN	LENGUAZAQUE	MACHETA	NEMOCÓN
NILO	PACHO	QUIPILE	SUBACHOQUE	SUESCA	SUTATAUSA
TABIO	TAUSA	VENECIA	VILLA DE SAN DIEGO DE UBATE	VILLAPINZÓN	ZIPAQUIRÁ
BETÉITIVA	BOAVITA	CHITA	CORRALES	EL ESPINO	JERICÓ
LA UVITA	PANQUEBA	PAZ DE RÍO	SAN MATEO	SATIVANORTE	SATIVASUR
SOCHA	SOCOTÁ	SUSACÓN	TASCO	AQUITANIA	BUENAVISTA
CHIVATÁ	CÓMBITA	CUCAITA	DUITAMA	GAMEZA	IZA
JENESANO	MONGUA	MONGUÍ	MOTAVITA	NOBSA	PAIPA
PESCA	RAQUIRA	SAMACÁ	SOGAMOSO	TIBANÁ	TÓPAGA
TOTA	TUNJA	TUTA			

Fuente: (SIMCO, 2013)

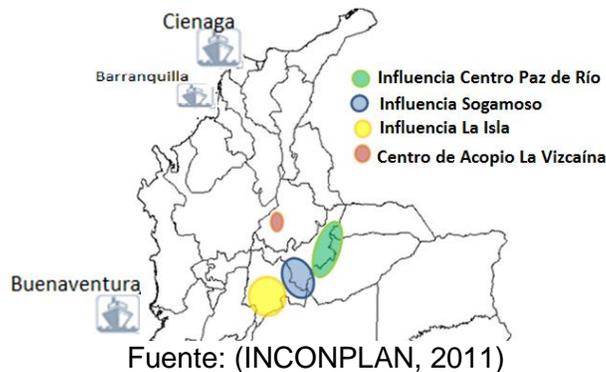
Centro de acopio secundario: El centro de acopio secundario es punto que recibe la carga de los centros primarios mediante una conexión férrea. A su vez, el centro de acopio secundario tendrá conexión férrea y fluvial hacia los puertos sobre el Atlántico y Pacífico. La figura 28 muestra la ubicación geográfica del centro de Acopio La Vizcaína.

Figura 28 Posición geográfica de los centros de acopio primarios y secundarios.



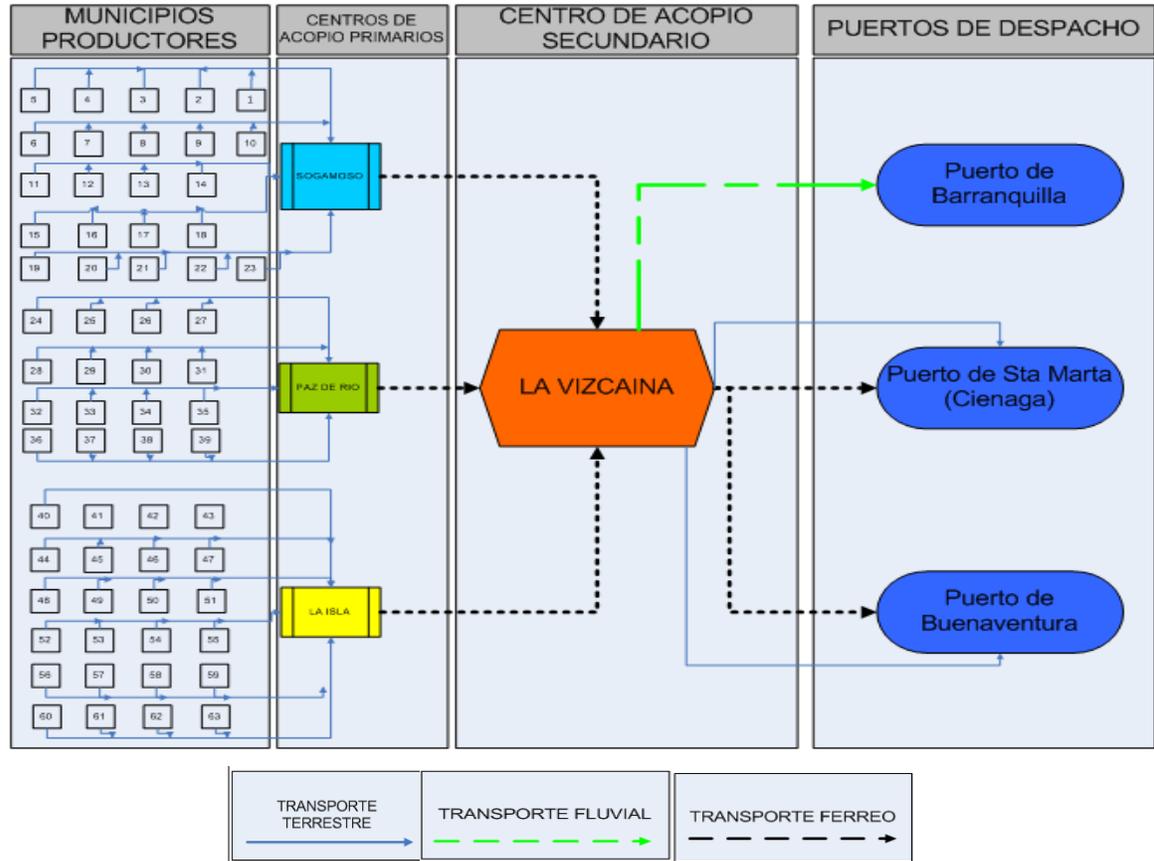
Puertos marítimos: Los puertos marítimos son los centros de acopio finales desde los cuales se despachará el carbón hacia los países destino. Como se muestra en la figura 29, hay dos sobre el Atlántico y uno sobre el Pacífico.

Figura 29 Ubicación geográfica de Puertos sobre el Atlántico y Pacífico



Transporte: En el eslabón de transporte se manejarán los medios terrestre, fluvial y férreo teniendo cada uno capacidad asociada por año y escenario. De acuerdo a los proyectos existentes, el objetivo del transporte principalmente será reducir el costo e incrementar el desempeño (SteadieSeif, Dellaer, Nuijten, Van Woensel, & Raoufi, 2013) además que sean soluciones sustentables, buscando traslados eficientes y efectivos (Ghiani, Laporte, & Musmanno, 2013). La figura 30 muestra los tipos de transporte que se usarían entre nodos.

Figura 30 Tipo de medio de transporte usado entre nodos



Fuente: (INCONPLAN, 2011)

El transporte multimodal se evidencia en el presente trabajo y consiste en usar durante la secuencia del flujo al menos dos medios (EUROSTAT, 2009). Sin embargo existen más tipos que pueden ser el intermodal que usa el mismo medio de origen a destino sin intercambio de medio de transporte (Crainici & Kim, 2007), Co-modal que se enfoca en el uso eficiente de diferentes modos buscando la maximización global en términos de sustentabilidad (EUROSTAT, 2009) y sincro modal buscando combinaciones que son seleccionadas por los requerimientos del cliente (Verweij, 2011).

Para los commodities cuando se tienen facilidades logísticas es usual el transporte multimodal (Wisetjindawat, Yamamoto, & Marchal, 2012) por sus características, pues cumplen con un mercado de producción, de bienes, de logística y de infraestructura (Tavassy, 2008), su estrategia de distribución puede ser en tres niveles que son estratégica, táctica u operativa (Yaghini & Akhavan, 2012) y puede verse como un modelo de diseño de red (Network Design and transportation planning: Models and Algorithms, 1984).

En la literatura la distribución de commodities principalmente se centra en la reducción de costos, pero hay una tendencia a reducir las emisiones asociadas (Jeng-Wen & Chia-Yon,

1996). También se busca que se tengan soluciones para que el transporte de este tipo de bienes se rápido, seguro y de bajo costo (Lingaitiene, 2010), y que se pueda mitigar sus impactos en el aire, agua y recursos (Rondinelli & Berry, 2000).

En el caso del transporte de carbón los costos asociados a la logística juegan un rol clave en la sustentabilidad del negocio minero (Biljon, 2013) y más en los casos en donde la extracción no está cerca de puertos marítimos, por lo que el multimodalismo es clave para reducir costos y mejorar la distribución (Kim, 2009) (Groothedde, Ruijgrok, & Tavasszy, 2005). Se han desarrollado modelos cuyo objetivo es ahorrar costos (McCann, 2001) (Sahin B. , Yilmaz, Ust, Guneri, & Gulsun, 2009) (Beresford, Pettit, & Liu, 2011), sin embargo cada caso depende de su complejidad y características del caso.

Para el caso de estudio, el multimodalismo se realiza de acuerdo a las facilidades logísticas proyectadas, dando prioridad al medio férreo y fluvial. Para aquello que no se pueda transportar por estos, se recurre al terrestre.

3.3 Formulación de los modelos de optimización para la red de distribución del carbón desde el centro del país.

3.3.1 Modelación de la red de distribución con proyecto de infraestructura existentes.

Objetivo: Determinar la estrategia de distribución para municipios productores de carbón en Boyacá y Cundinamarca satisfaciendo la demanda de 15 países que son los principales compradores de carbón desde el centro del país, maximizando beneficios económicos, ambientales y sociales durante el periodo de 2013 a 2028 en tres escenarios de demanda.

Para lograr el objetivo, inicialmente se determina la estrategia de distribución a los largo de las 4 etapas mencionadas en la figura 30 con los proyectos de infraestructura existentes.

Posteriormente de acuerdo a los resultados de la red de distribución, se minimizará el transporte terrestre en la última etapa aumentando la capacidad de los otros medios, con el fin de aumentar beneficios ambientales y sociales (los beneficios económicos son proporcionales al volumen extraído que no se modificará).

INDICES

<i>i</i>	Índice que identifica los municipios productores de carbón $i = 1,2, \dots I$
<i>k</i>	Índice que identifica el tipo de carbón producido $k = 1,2, \dots K$
<i>j</i>	Índice que identifica el país destino de las exportaciones $j = 1,2, \dots J$
<i>e</i>	Índice que identifica el escenario de la demanda de carbón $e = 1,2, \dots E$
<i>t</i>	Índice que identifica el período de planeación $t = 1,2, \dots T$
<i>l</i>	Índice que identifica el medio de transporte $l = 1,2, \dots L$
<i>q</i>	Índice que identifica el centro de acopio primario $q = 1,2, \dots Q$

- r Índice que identifica el centro de acopio secundario $r = 1, 2, \dots, R$
 s Índice que identifica el sector económico impactado $s = 1, 2, \dots, S$

PARAMETROS

Producción y distribución: Estos parámetros se refieren principalmente a la oferta, y demanda de los nodos asociados a la red de distribución. Así mismo a la capacidad de los arcos, de acuerdo al tipo de transporte, y la distancia de estos.

- O_{ikt} Oferta del municipio productor “ i ” de carbón del tipo “ k ” en el año “ t ”.
- C_{qkt} Capacidad del centro de acopio primario “ q ” para el tipo de carbón “ k ” en el año “ t ”.
- $C1_{rkt}$ Capacidad del centro de acopio secundario “ r ” para el tipo de carbón “ k ” en el año “ t ”.
- CAP_{lt} Capacidad del medio de transporte “ l ” en el año “ t ”.
- DEM_{jket} Demanda del país “ j ” por tipo de carbón “ k ” en el escenario “ e ” y año “ t ”.
- DIS_{iq} Distancia desde el municipio productor de carbón “ i ” hasta el centro de acopio primario “ q ”.
- $DIS1_{qr}$ Distancia desde el centro de acopio primario “ q ” hasta el centro de acopio secundario “ r ”.
- $DIS2_{rjl}$ Distancia desde centro de acopio secundario “ r ” hacia puertos de despacho al país “ j ” en el medio de transporte “ l ”.

Ambientales, sociales y económicos: Los parámetros ambientales son dos: el primero está asociado a las emisiones generadas de CO₂ durante el transporte de acuerdo al medio usado y el segundo es el valor del bono de carbono de acuerdo al mercado transado para este derivado financiero (un bono de carbono es el valor que le da el mercado a la emisión de una tonelada de CO₂). Para los de tipo económico es el valor que tiene la producción y distribución de una kilo tonelada en diversos sectores que han sido previamente estudiados. Finalmente dentro de los parámetros sociales, el cálculo de regalías se obtiene teniendo en cuenta el precio FOB por tipo de carbón.

- Em_l Emisiones del medio de transporte “ l ”.
- BON_{et} Valor del bono de carbón en el escenario “ e ” y año “ t ”.
- VLR_s Impacto económico sobre el sector “ s ” de producir una kilotonelada de carbón.
- FOB_{ket} Valor FOB del carbón tipo “ k ” en el escenario “ e ” y año “ t ”.

$\%REG_{kl}$ Porcentaje para cálculo de regalías para carbón tipo “k” que depende del medio de transporte “l”.

VARIABLES

Producción y distribución: Las variables de este tipo se refieren exclusivamente a la cantidad de carbón movilizado expresado como kilo toneladas.

$Q_{iketq} \in \mathbb{R}^+$ Cantidad de carbón extraído del municipio “i” del tipo “k” en el escenario “e” y año “t”, dirigido al centro de acopio primario “q”.

$Q1_{qketr} \in \mathbb{R}^+$ Cantidad de carbón dirigido desde el centro de acopio primario “q” del tipo “k” en el escenario “e” y año “t”, hasta el centro de acopio secundario “r”.

$Q3_{rketj} \in \mathbb{R}^+$ Cantidad de carbón dirigido desde el centro de acopio secundario “r” del tipo “k” en el escenario “e” y año “t” que se moviliza con destino al país “j”.

$Q4_{jketl} \in \mathbb{R}^+$ Cantidad de carbón con destino al país “j” del tipo “k” en el escenario “e” y año “t” movilizado en el medio de transporte “l”.

Ambientales, sociales y económicos: Las variables ambientales para el trabajo son de dos tipos: la primera se refiere al volumen generado por emisiones de cada medio de transporte usado en la movilización de carbón y la segunda, el valor de estas emisiones de acuerdo al precio que tenga el bono de carbono de forma que se tenga una misma unidad respecto a las variables sociales y económicas.

Las variables sociales son tomadas en este caso como las regalías generadas por la distribución de carbón pues como se indicó previamente, el alcance del trabajo no incluye el destino de estas sino solamente el monto.

Las variables económicas indican el impacto sobre cada uno de los sectores asociados en la extracción y distribución del carbón.

$VOL_{iqketl} \in \mathbb{R}^+$ Volumen de emisiones de CO2 generadas por el transporte terrestre desde municipio “i” hasta centro de acopio primario “q” de tipo de carbón “k” en el escenario “e” y año “t”.

$VLR_{iqket} \in \mathbb{R}^+$ Valor económico de las emisiones de CO2 para el carbón transportado desde municipio “i” hasta centro de acopio primario “q” de tipo “k” en el escenario “e” y año “t”.

$VOL1_{qrketl} \in \mathbb{R}^+$ Volumen de emisiones de CO2 para el carbón transportado desde el centro de acopio primario “q” hasta el centro de acopio secundario “r” de tipo “k” en el escenario “e” y año “t” que se moviliza en el tipo de transporte férreo.

$VLR1_{qrket} \in \mathbb{R}^+$ Valor económico de las emisiones de CO2 para el carbón transportado desde el centro de acopio primario “q” hasta el centro de acopio secundario “r” de tipo “k” en el escenario “e” y año “t”.

$VOL2_{rjketl} \in \mathbb{R}^+$ Volumen de emisiones de CO2 para el carbón transportado desde el centro de acopio secundarios “r” hacia puertos de despacho al país “j” del tipo “k” en el escenario “e” y año “t” en el medio de transporte “l”.

$VLR2_{rjket} \in \mathbb{R}^+$ Valor económico de emisiones de CO2 para el carbón transportado desde el centro de acopio secundarios “r” hacia puertos de despacho al país “j” del tipo “k” en el escenario “e” y año “t”.

$ECO_{skea j} \in \mathbb{R}^+$ Valor económico sobre el sector “s” por extracción del carbón tipo “k” en el escenario “e” y año “t” que se dirige al país “j”.

$REG_{ketj} \in \mathbb{R}^+$ Valor económico de las regalías generado por la extracción del carbón tipo “k” en el escenario “e” y año “t” que se dirige al país “j”.

Función objetivo: Maximizar beneficios ambientales, económicos y sociales de la distribución de carbón.

$$\text{Max } z = ECO_{skea j} + REG_{ketj} - VLR2_{rjket} - VLR1_{qrket} - VLR_{iqket}$$

Restricciones

La restricción (2) indica que la cantidad de carbón extraído hacia los centros de acopio primario es mayor o igual a la oferta de cada municipio para cada tipo, escenario y año planteado.

$$\sum_q Q_{iketq} \geq O_{ikt} \quad \forall i, \forall e, \forall t, \forall k \quad (2)$$

La restricción (3) indica que la cantidad de carbón extraído desde los municipios es menor o igual a la capacidad de cada centro de acopio primario para cada tipo, escenario y año planteado.

$$\sum_i Q_{iketq} \leq C_{qkt} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall q \quad (3)$$

La restricción (4) indica que la cantidad de carbón en el centro de acopio secundario debe ser igual a la cantidad de carbón extraído desde los municipios que pasaron en cada centro de acopio primario en cada tipo, escenario y año planteado.

$$\sum_r Q1_{qketr} = \sum_i Q_{iketq} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall q \quad (4)$$

La restricción (5) indica que la cantidad de carbón movilizado a cada país debe ser igual a la cantidad de carbón que sale desde los centros de acopio primarios en cada tipo, escenario y año planteado.

$$\sum_q Q1_{qketr} = \sum_j Q3_{rketj} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall r \quad (5)$$

La restricción (6) indica que la cantidad de carbón que sale del centro de acopio secundario debe ser igual a la demanda de cada país en cada tipo, escenario y año planteado.

$$\sum_r Q3_{rketj} = DEM_{jket} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall j \quad (6)$$

La restricción (7) indica que la cantidad de carbón transportado debe ser igual o menor a la capacidad que tiene cada medio de transporte hacia cada país en cada tipo, escenario y año planteado.

$$\sum_j Q4_{jketl} = CAP_{lt} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall l \quad (7)$$

La restricción (8) indica que la cantidad de carbón que sale del centro de acopio secundario es igual la cantidad de carbón transportado en los medios de transporte hacia cada país en cada tipo, escenario y año planteado.

$$\sum_q Q3_{rketj} = \sum_l Q4_{jketl} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall j \quad (8)$$

La restricción (9) indica que el volumen de emisiones de CO2 es igual al volumen transportado desde los municipios a los centros de acopio primarios por la distancia y el volumen de emisión solo para el transporte terrestre para cada tipo, escenario y año planteado.

$$VOL_{iqketl} = Q_{iketq} * DIS_{iq} * Em_l \quad \forall l(terrestre), \forall i, \forall q, \forall k, \forall e, \forall t \quad (9)$$

La restricción (10) indica que el valor económico de las emisiones de CO2 para el volumen transportado desde los municipios a los centros de acopio primarios es igual al volumen de estas emisiones por el valor de los bonos de carbono en el escenario y año planteado.

$$VLR_{iqket} = VOL_{iqketl} * BON_{et} \quad \forall i, \forall q, \forall k, \forall e, \forall t, \forall l(terrestre) \quad (10)$$

La restricción (11) indica que el volumen de emisiones de CO2 es igual al volumen transportado desde los centros de acopio primarios al secundario por la distancia y volumen de emisión solo para transporte férreo para cada escenario y año planteado.

$$VOL1_{qrketl} = Q1_{qketr} * DIS1_{qr} * Em_l \quad \forall l(ferreo), \forall r, \forall q, \forall k, \forall e, \forall t \quad (11)$$

La restricción (12) indica que el valor económico de las emisiones de CO2 para el volumen transportado desde los centros de acopio primarios al centro de acopio secundario es igual al volumen de estas emisiones por el valor de los bonos de carbono en el escenario y año planteado.

$$VLR1_{qrket} = VOL1_{qrketl} * BON_{et} \quad \forall q, \forall r, \forall k, \forall e, \forall t, \forall l(\text{terrestre}) \quad (12)$$

La restricción (13) indica que el volumen de emisiones de CO2 es igual al volumen transportado desde el centro de acopio secundario por la distancia hacia los puertos para despachar a los países y volumen de emisión por tipo de transporte usado para cada escenario y año planteado.

$$VOL2_{rjketl} = Q4_{jketl} * DIS2_{rjl} * Em_l \quad \forall j, \forall r, \forall k, \forall e, \forall t, \forall l \quad (13)$$

La restricción (14) indica que el valor económico de las emisiones de CO2 para el volumen transportado desde los centros de acopio secundarios a puertos para despachar a los países es igual al volumen de estas emisiones por el valor de los bonos de carbono en el escenario y año planteado.

$$VLR2_{rjket} = VOL2_{rjketl} * BON_{et} \quad \forall j, \forall r, \forall k, \forall e, \forall t, \forall l \quad (14)$$

La restricción (15) indica que el impacto económico total sobre en un sector del mercado es igual a la cantidad de carbón extraído por el impacto sobre el sector en el escenario y año planteado.

$$ECO_{sketj} = \sum_0 Q_{iketq} * VLR_s \quad \forall s, \forall k, \forall e, \forall t, \forall j, \forall i, \forall q \quad (15)$$

La restricción (16) indica que el valor de las regalías es igual al volumen de carbón por el porcentaje asignado de regalía, por el precio FOB para cada tipo, escenario y año planteado.

$$REG_{ketj} = \sum_0 Q_{iketq} * \%REG_{kl} * FOB_{ket} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall j, \forall i, \forall q, \forall l \quad (16)$$

3.3.2 Modelación de la red de distribución eliminando el transporte terrestre en la última etapa.

Una vez generados los resultados con el modelo anterior, la meta será reducir el uso del transporte terrestre en un 100% desde la Vizcaína de forma que se reduzcan las emisiones de CO2 (impactos ambientales) y aumenten las regalías (impactos sociales). Para los impactos económicos, el alcance de este trabajo solamente abarca los asociados al volumen de producción y teniendo en cuenta que no habrá variaciones en el volumen global, no se asignará meta en este aspecto.

Lo anterior teniendo en cuenta que el transporte terrestre es el más contaminante durante la última etapa en comparación a los otros dos medios, además que para largas distancias su costo es el más alto (Sevim & Sharma, 1991) teniendo en cuenta que desde el centro de acopio de la Vizcaina la distancia hacia puerto sobre el Atlántico o Pacífico es superior a 350 kilómetros (Sahin B. , Yilmaz, Ust, Guneri, & Gulsun, 2009). Finalmente los medios de transporte fluvial y férreo serían ideales para reemplazar el terrestre debido a que las distancias en el medio colombiano están dentro del rango óptimo (Belanina, 2013).

Función objetivo: Maximizar beneficios ambientales y sociales de la distribución de carbón eliminando el transporte terrestre de la red de distribución, reemplazándolo por medios férreo o fluvial.

$$\text{Min } z = d_{jketl}^-(\text{terrestre})$$

$$\sum_q Q_{iketq} \geq O_{ikt} \quad \forall i, \forall e, \forall t, \forall k \quad (2)$$

$$\sum_i Q_{iketq} \leq C_{qkt} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall q \quad (3)$$

$$\sum_r Q1_{qketr} = \sum_i Q_{iketq} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall q \quad (4)$$

$$\sum_r Q3_{rketj} = DEM_{jket} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall j \quad (6)$$

$$\sum_j Q4_{jketl} = CAP_{lt} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall l \quad (7)$$

La restricción (8) indica que la cantidad de carbón que sale del centro de acopio secundario es igual la cantidad de carbón transportado en los medios de transporte hacia cada país menos el volumen que se minimizará del medio terrestre más el aumento de las capacidades en los medios fluviales y férreo en cada tipo, escenario y año planteado.

$$\sum_q Q3_{rketj} = \sum_l Q4_{jketl} - d_{jketl}^-(\text{terrestre}) + d_{jketl}^+(\text{fluvial}) + d_{jketl}^+(\text{ferreo}) \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall j \quad (8)$$

$$VOL_{iqketl} = Q_{iketq} * DIS_{iq} * Em_l \quad \forall l(\text{terrestre}), \forall i, \forall q, \forall k, \forall e, \forall t \quad (9)$$

$$VLR_{iqket} = VOL_{iqketl} * BON_{et} \quad \forall i, \forall q, \forall k, \forall e, \forall t, \forall l(\text{terrestre}) \quad (10)$$

$$VOL1_{qrketl} = Q1_{qketr} * DIS1_{qr} * Em_l \quad \forall l(\text{ferreo}), \forall r, \forall q, \forall k, \forall e, \forall t \quad (11)$$

$$VLR1_{qrket} = VOL1_{qrketl} * BON_{et} \quad \forall q, \forall r, \forall k, \forall e, \forall t, \forall l(\text{terrestre}) \quad (12)$$

La restricción (13) indica que el volumen de emisiones de CO2 del escenario inicial planteado debe ser menor o igual al volumen de carbón transportado en los medios de transporte hacia cada país menos el volumen que se minimizará del medio terrestre más el aumento de las capacidades en los medios fluviales y férreo por la distancia hacia los puertos para despachar a los países y volumen de emisión por tipo de transporte usado para cada escenario y año planteado.

$$Emisiones\ CO2\ INICIALES \leq (Q4_{jketl} - d_{jketl(terrestre)}^- + d_{jketl(fluvial)}^+ + d_{jketl(ferreo)}^+) * DIS2_{rjl} * Em_l \quad \forall j, \forall r, \forall k, \forall e, \forall t, \forall l \quad (13)$$

$$VLR2_{rjket} = VOL2_{rjketl} * BON_{et} \quad \forall j, \forall r, \forall k, \forall e, \forall t, \forall l \quad (14)$$

$$ECO_{sketj} = \sum_0 (Q_{iketq}) * VLR_s \quad \forall s, \forall k, \forall e, \forall t, \forall j, \forall i, \forall q \quad (15)$$

La restricción (16) indica que el valor de las regalías es igual al volumen de carbón transportado en los medios de transporte hacia cada país menos el volumen que se minimizará del medio terrestre más el aumento de las capacidades en los medios fluviales y férreo por el porcentaje asignado de regalía, por el precio FOB para cada tipo, escenario y año planteado.

$$REG_{ketj} = (Q4_{jketl} - d_{jketl(terrestre)}^- + d_{jketl(fluvial)}^+ + d_{jketl(ferreo)}^+) * \%REG_{kl} * FOB_{ket} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall j, \forall i, \forall q, \forall l \quad (16)$$

La restricción (17) indica que el volumen que se deja de transportar en el medio terrestre debe ser igual al aumento de la capacidad en los medios férreo y fluvial.

$$d_{jketl(terrestre)}^- = d_{jketl(fluvial)}^+ + d_{jketl(ferreo)}^+ \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall j, \forall l \quad (17)$$

La restricción (18) indica que el volumen transportado incluyendo las diferencias de capacidad en cada uno de los medios, debe ser igual a la demanda de cada país para los tipos, escenarios y años planteados.

$$\sum_{l(ferreo,fluvial)} Q4_{jketl} + -d_{jketl}^- + d_{jketl(fluvial)}^+ + d_{jketl(ferreo)}^+ = DEM_{jket} \quad \forall k, \forall e, \forall t, \forall j \quad (18)$$

3.4 Experimentación

La experimentación del trabajo se dividirá en 2 partes. En la primera, con las capacidades proyectadas en los diversos medios de transporte se suplirá la demanda de cada país de acuerdo al escenario, obteniendo la red de distribución con los impactos ambientales, económicos y sociales asociados.

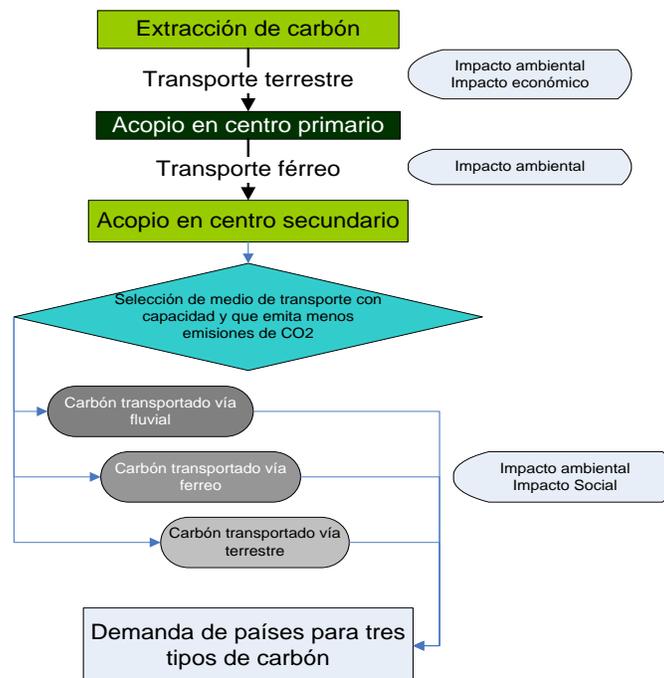
En la segunda parte, el objetivo será la minimización el transporte terrestre aumentando la capacidad de los otros medios, con lo cual los impactos sociales aumentarán y los ambientales se reducirán.

3.4.1 Escenario inicial

Para el escenario inicial el flujo de carbón inicia desde los municipios extractores transportándose hacia los centros de acopio primarios, que son 3. En este primer eslabón se generan impactos ambientales pues el traslado desde municipios al centro de acopio genera emisiones de CO₂ por el transporte terrestre e impactos económicos, pues la extracción y distribución estimula diversos sectores productivos del país. En el segundo eslabón nuevamente se generan impactos ambientales por las emisiones de CO₂ vía férrea desde el centro de acopio primario al secundario. Finalmente en el tercer eslabón se generan impactos ambientales por las emisiones de los medios de transporte usados (terrestre, férreo y fluvial) de centros de acopio secundarios a puertos, así como impactos sociales, pues estos son producto de la generación de regalías.

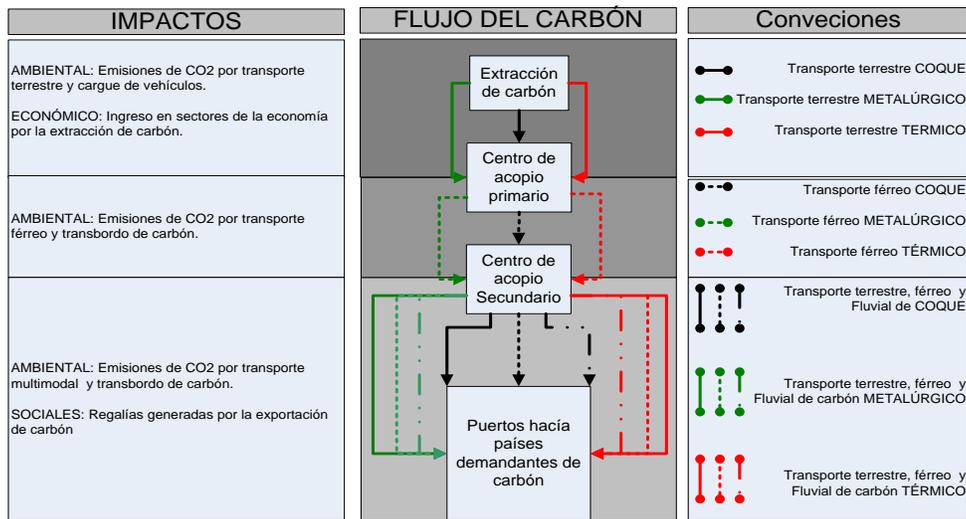
El desarrollo de la red de distribución se estableció con el apoyo del software de modelación algebraica GAMS con el Solver CPLEX. La figura 31 muestra el proceso que seguirá el software y la figura 32 como será la asignación de medios de transporte por tipo de carbón e impactos asociados en cada eslabón.

Figura 31 Método de resolución para hallar la red de distribución



Fuente: El autor

Figura 32 Impactos y medios de transporte usados a lo largo de la red de distribución.

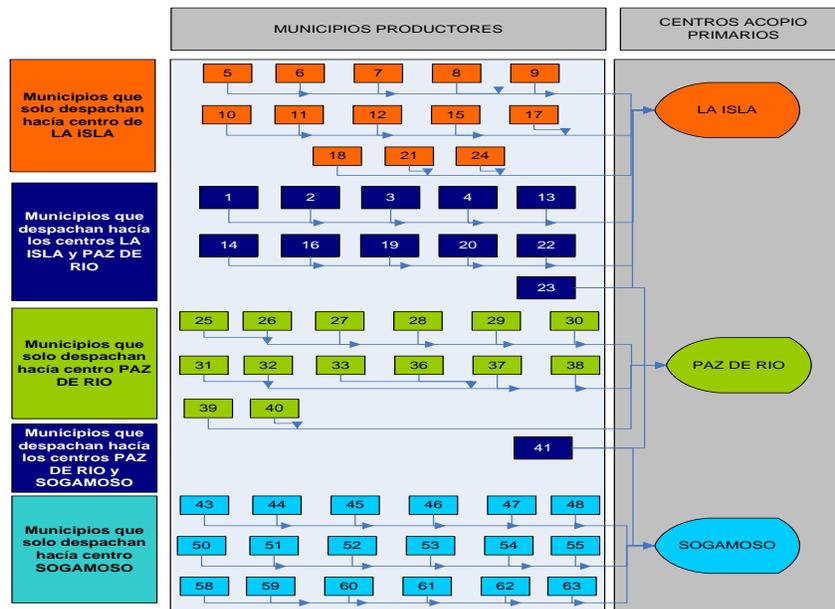


Fuente: (INCONPLAN, 2011)

Una vez generada la modelación, los resultados en cada una de las etapas fue la siguiente:

Primer eslabón: De los 63 municipios que tienen oferta de carbón, en la red se incorporaron solamente 57. Esto se da pues las lejanas distancias de los 6 municipios aumentan la emisión de CO2 y estos pueden ser reemplazados por alguno de los 57 que quedaron dentro del modelo. La figura 33 y tabla 21 muestra el destino de los municipios productores.

Figura 33 Flujo del carbón de municipios extractores a centro de acopio primarios.



Fuente: El autor

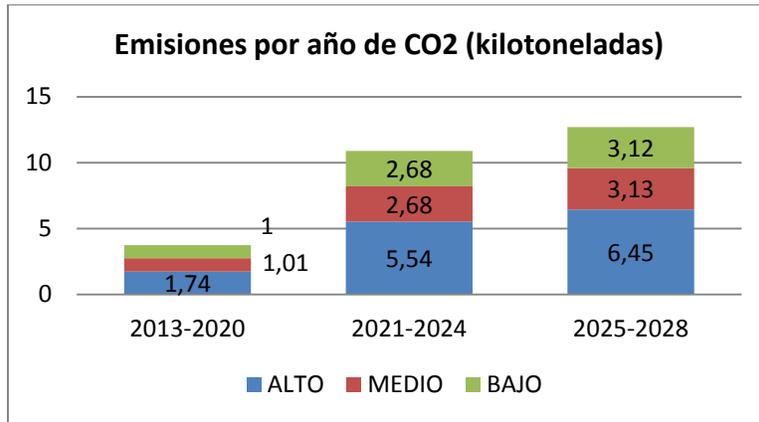
Tabla 21 Flujo del carbón de municipios extractores a centro de acopio primarios.

LA ISLA			
5	COGUA	12	NEMOCÓN
6	CUCUNUBÁ	15	QUIPILE
7	GUACHETÁ	17	SUESCA
8	GUATAVITA	18	SUTATAUSA
9	JERUSALÉN	21	VENECIA
10	LENGUAZAQUE	24	ZIPAQUIRÁ
11	MACHETA		
LA ISLA Y PAZ DE RIO			
1	TURMEQUÉ	16	SUBACHOQUE
2	UMBITA	19	TABIO
3	VENTAQUEMADA	20	TAUSA
4	CAPARRAPÍ	22	UBATE
13	NILO	23	VILLAPINZÓN
14	PACHO		
PAZ DE RIO			
25	BETÉITIVA	32	PANQUEBA
26	BOAVITA	33	PAZ DE RÍO
27	CHITA	36	SATIVASUR
28	CORRALES	37	SOCHA
29	EL ESPINO	38	SOCOTÁ
30	JERICÓ	39	SUSACÓN
31	LA UVITA	40	TASCO
PAZ DE RIO Y SOGAMOSO			
41	AQUITANIA		
SOGAMOSO			
43	CHIVATÁ	53	NOBSA
44	CÓMBITA	54	PAIPA
45	CUCAITA	55	PESCA
46	DUITAMA	58	SOGAMOSO
47	GAMEZA	59	TIBANÁ
48	IZA	60	TÓPAGA
50	MONGUA	61	TOTA
51	MONGUÍ	62	TUNJA
52	MOTAVITA	63	TUTA

Fuente: El autor

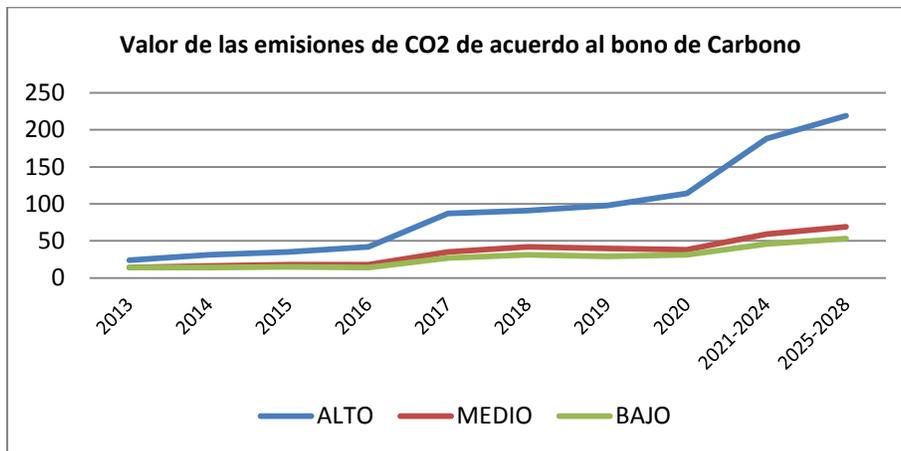
Las emisiones de CO2 en el primer eslabón dependen del escenario de demanda y están en función del volumen demandado. La figura 34 muestra las emisiones de CO2 por año y escenario en kilo toneladas y la figura 35 el valor de acuerdo a las proyecciones de la cotización del bono de carbono.

Figura 34 Emisiones de CO2 generados en el primer eslabón de la red de distribución de carbón en kilotoneladas.



Fuente: El autor

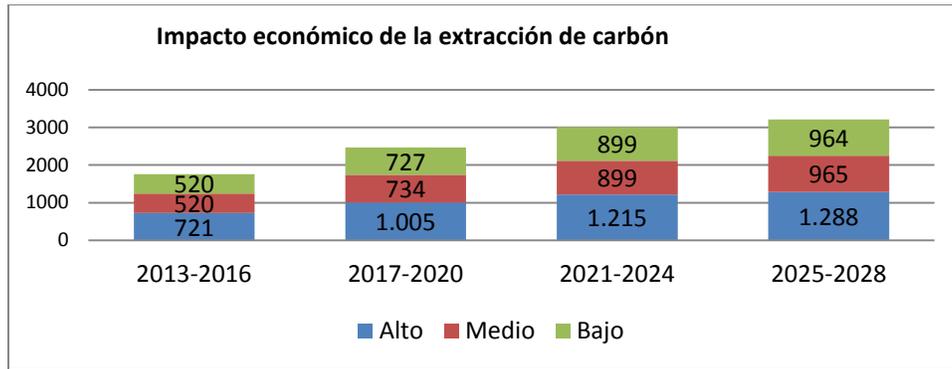
Figura 35 Valor de las emisiones de CO2 en el primer eslabón de acuerdo a la cotización del bono de carbono (miles de dolares).



Fuente: El autor

Respecto al impacto económico, el volumen de carbón extraído genera beneficios anuales en al menos 520 mil dependiendo del escenario. La figura 36 totaliza los impactos por escenario.

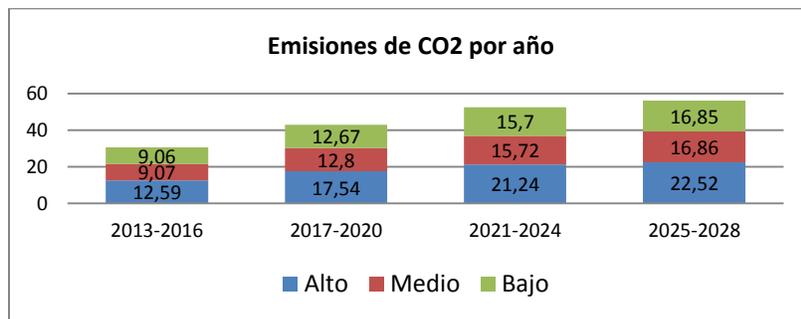
Figura 36 Impacto económico por año de la extracción de carbón en 31 sectores de la economía (miles dólares)



Fuente: El autor

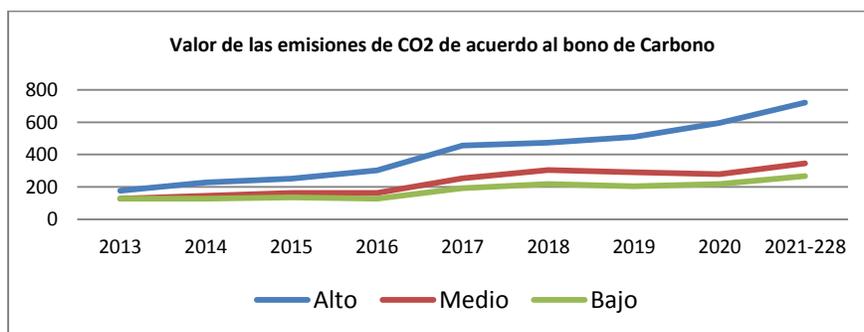
En el segundo eslabón, pese a que es mediante transporte férreo, las emisiones de CO2 aumentan respecto al primero principalmente por las distancias de los centros de acopio primario al secundario. La figura 37 muestra el total de emisiones y la figura 38 el valor de acuerdo a la cotización del bono de carbono.

Figura 37 Emisiones de CO2 generados en el segundo eslabón de la red de distribución de carbón en kilotoneladas.



Fuente: El autor

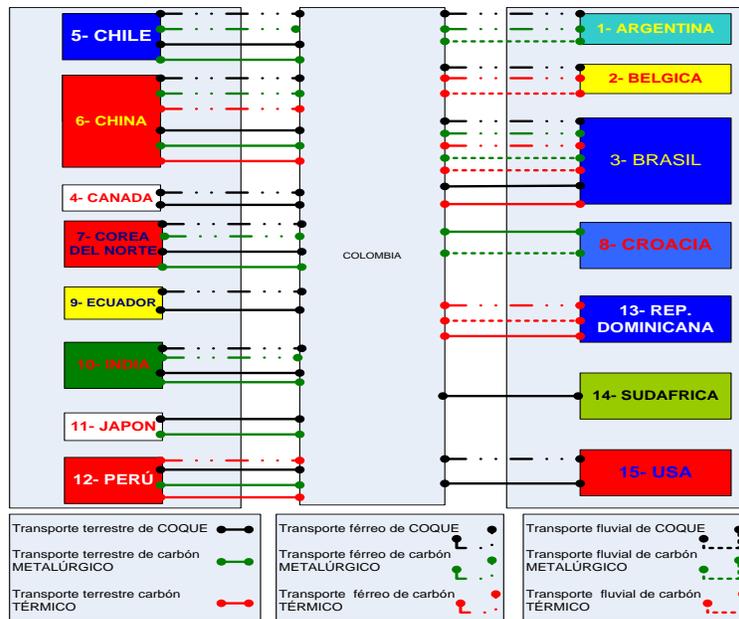
Figura 38 Valor de las emisiones de CO2 en el segundo eslabón de acuerdo a la cotización del bono de carbono (Miles dólares).



Fuente: El autor

El tercer eslabón indica los medios de transporte usados para trasladar el carbón desde el centro de acopio secundario a puertos para suplir la demanda de los países, pues pese a que el cargue se hace desde puerto marítimo con destino a diversos países, el flujo por tipo de carbón y medio de transporte es diferente para cada destino. La figura 39 muestra el medio de transporte usado para suplir la demanda de cada territorio por tipo de carbón.

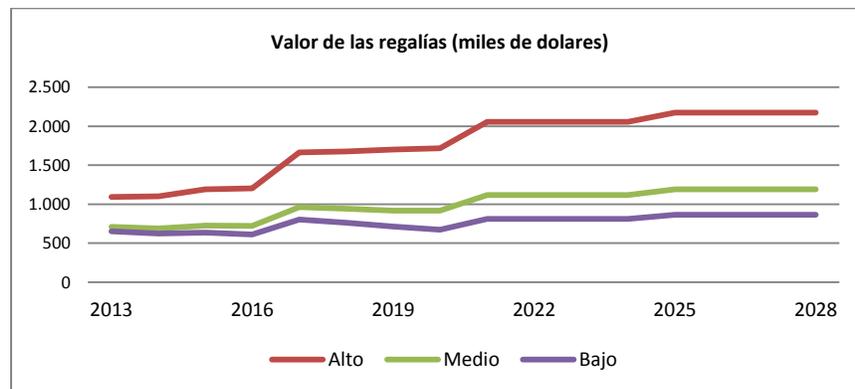
Figura 39 Medios de transporte por tipo de carbón usado para suplir la demanda de cada país.



Fuente: El autor

Respecto a las regalías, estas no dependen solamente del volumen exportado sino del medio de transporte utilizado. La figura 40 muestra el valor generado por regalías en cada año y escenario.

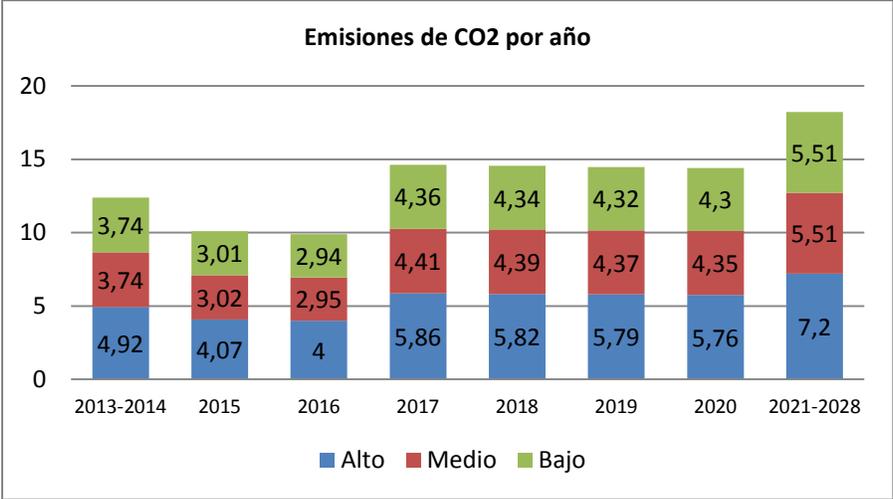
Figura 40 Regalías generadas por la extracción de carbón (Miles dólares)



Fuente: El autor

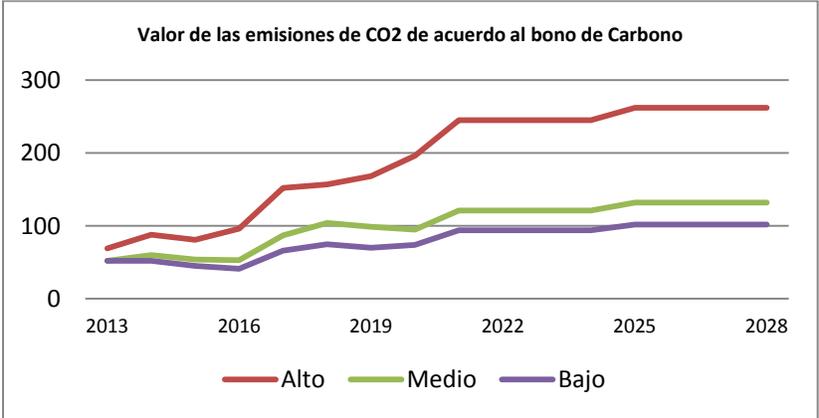
Finalmente las emisiones en el último eslabón combinan varios medios de transporte, y la sumatoria de emisiones no supera a la del segundo eslabón. La figura 41 evidencia las emisiones de CO2 en el último eslabón y la figura 42 indica el valor económico de acuerdo a la cotización del bono de carbono.

Figura 41 Emisiones de CO2 generados en el tercer eslabón de la red de distribución de carbón en kilotoneladas.



Fuente: El autor

Figura 42 Valor de las emisiones de CO2 en el tercer eslabón de acuerdo a la cotización del bono de carbono (Miles dólares).



Fuente: El autor

De acuerdo a lo anterior, el resultado de la función objetivo para cada uno de los escenarios y años se muestra en la tabla 22.

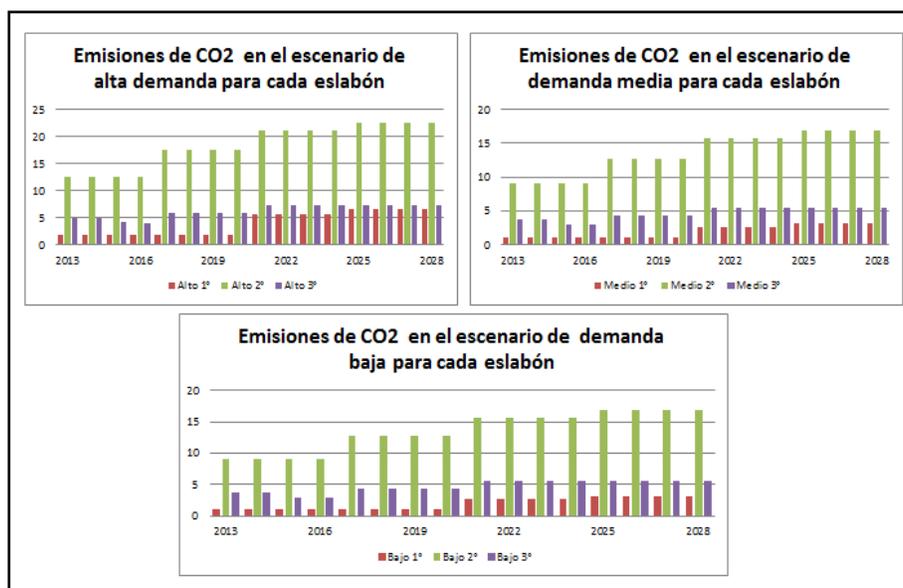
Tabla 22 Resultado final por cada escenario planteado (Miles dólares)

Escenarios	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Total
Alto	1.544	1.475	1.542	1.484	1.972	1.960	1.930	1.815	2.115	2.115	2.115	2.115	2.214	2.214	2.214	2.214	31.039
Bajo	978	922	961	948	1.243	1.163	1.135	1.075	1.302	1.302	1.302	1.302	1.386	1.386	1.386	1.386	19.206
Medio	1.034	1.017	1.012	1.006	1.322	1.224	1.221	1.240	1.488	1.488	1.488	1.488	1.582	1.582	1.582	1.582	21.327

Fuente: El autor

Al hacer comparaciones por eslabones, el primer eslabón es el de menores emisiones pues pese a que todo el volumen se transporta por medio terrestre, que es el más contaminante, las distancias recorridas son las menores. El segundo eslabón en todos los escenarios es el de mayor volumen de emisiones pues pese a que es en medio férreo, presenta mayores distancias que el primero. Finalmente el tercer eslabón muestra un descenso respecto a su antecesor, pues las emisiones se reducen principalmente por el medio fluvial, el menos contaminante de todos. La figura 43 muestra por cada escenario de demanda las emisiones en cada uno de los eslabones de la red de distribución.

Figura 43 Emisiones de CO2 por escenario y eslabón de la red de distribución.

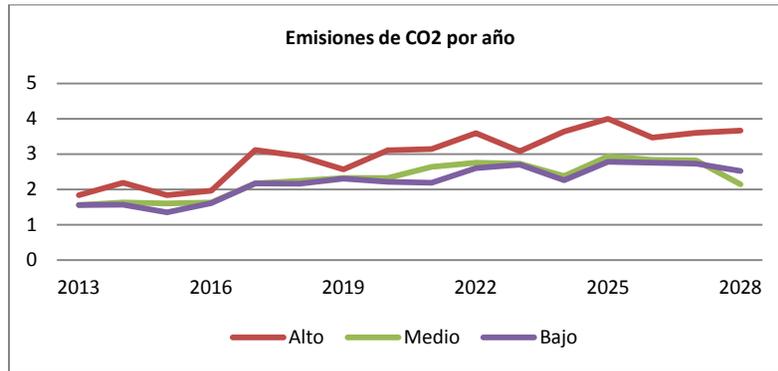


Fuente: El autor

3.4.2 Escenario minimizando la distribución de carbón en transporte terrestre desde centro de acopio secundario hacia puertos.

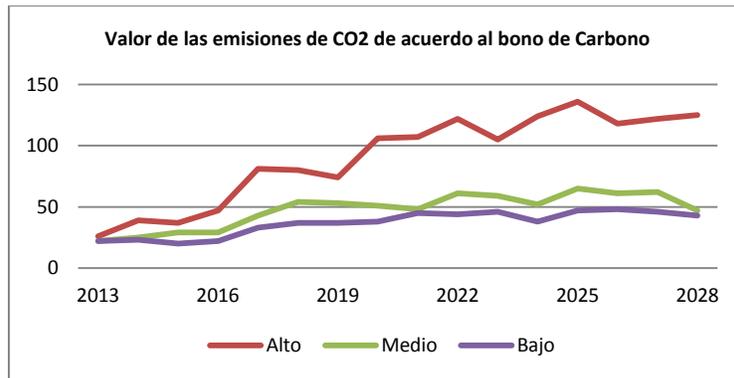
Reduciendo la capacidad de transporte terrestre en 189.747 kilotoneladas, se reducen las emisiones de CO2 y se aumenta las regalías. La figura 44 evidencia las emisiones para cada año y escenario planteado, la figura 45 el valor económico de acuerdo al bono de carbono y la figura 46 el valor generado por regalías con la nueva distribución de transporte.

Figura 44 Emisiones de CO2 generados en el tercer eslabón de la red de distribución de carbón en kilotoneladas.



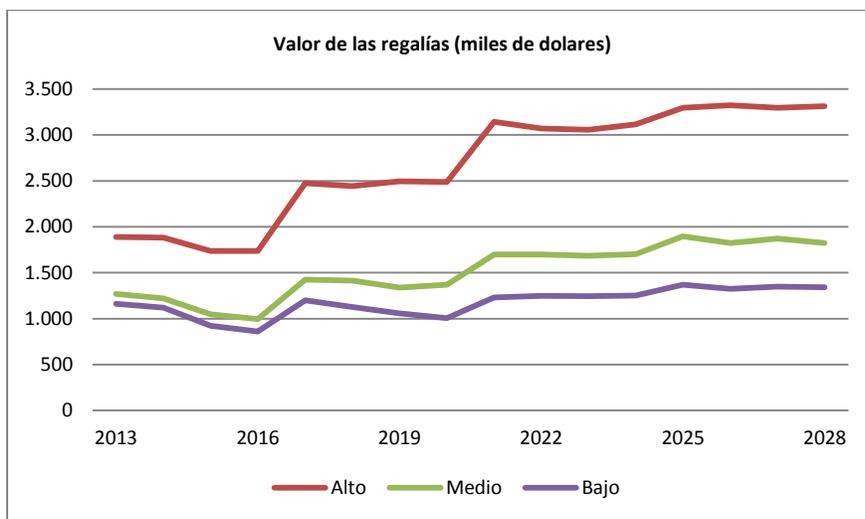
Fuente: El autor

Figura 45 Valor de las emisiones de CO2 en el tercer eslabón de acuerdo a la cotización del bono de carbono (Miles dólares)



Fuente: El autor

Figura 46 Regalías generadas por la extracción de carbón (Miles dólares)



Fuente: El autor

De acuerdo a lo anterior, al reducir la capacidad de transporte terrestre el resultado global de la operación para cada año y escenario se indica en la tabla 23.

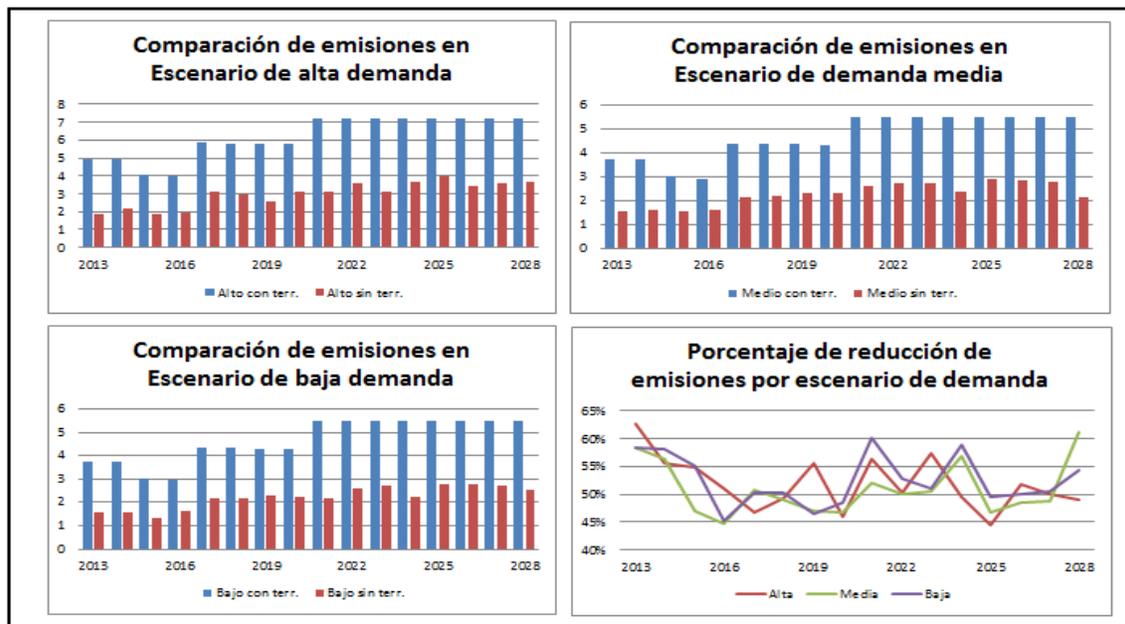
Tabla 23 Resultado final por cada escenario planteado (Miles dólares)

Escenario	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Total
Alto	2.384	2.306	2.135	2.066	2.854	2.805	2.821	2.677	3.340	3.253	3.256	3.297	3.463	3.507	3.478	3.491	47.133
Bajo	1.519	1.453	1.272	1.216	1.683	1.575	1.520	1.452	1.772	1.789	1.784	1.800	1.949	1.900	1.926	1.924	26.533
Medio	1.626	1.575	1.356	1.304	1.819	1.742	1.680	1.728	2.146	2.131	2.120	2.144	2.357	2.288	2.336	2.302	30.654

Fuente: El autor

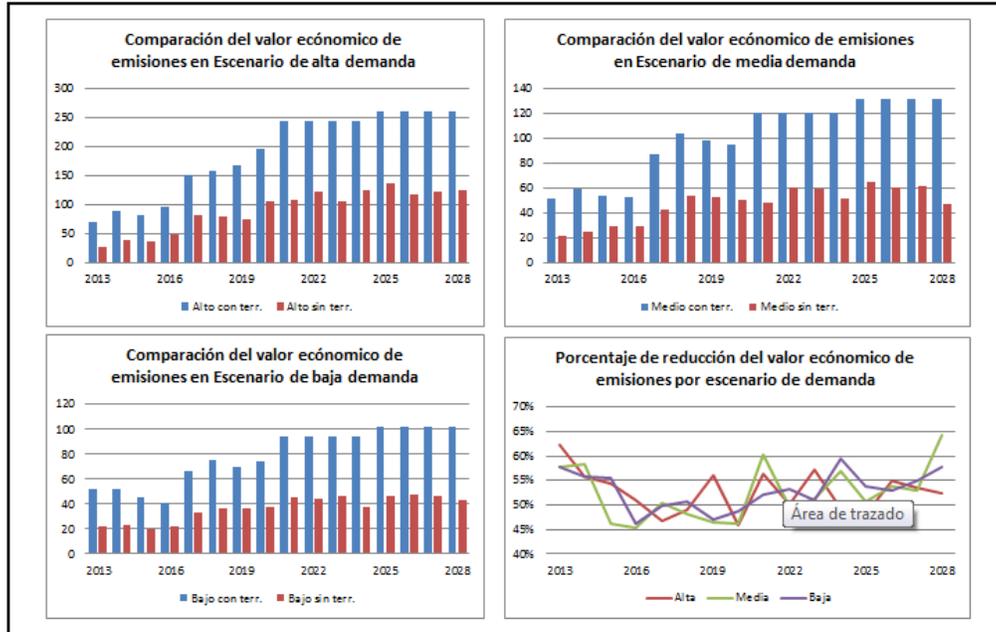
Haciendo un comparativo entre las emisiones de CO2 que se generan en el tercer eslabón en cada escenario, se evidencia una reducción de al menos un 44% para cada caso, lo que implica también una reducción en el valor económico de estas emisiones respecto al valor del bono de carbono. La figura 47 muestra el comparativo entre las emisiones de CO2 así como el porcentaje de reducción y la figura 48 lo hace con el valor económico de estas emisiones.

Figura 47 Comparativo de emisiones de CO2 y reducción porcentual minimizando transporte terrestre.



Fuente: El autor

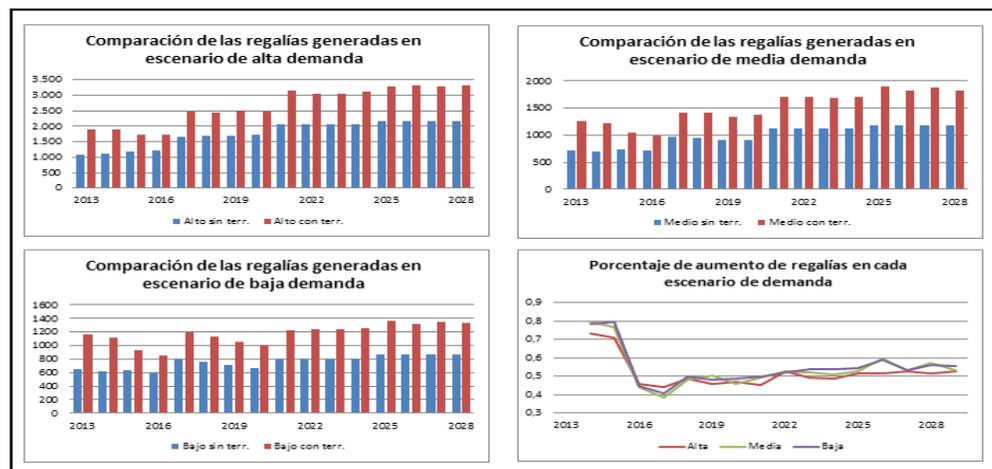
Figura 48 Comparativo de valor económico de emisiones de CO2 y reducción porcentual minimizando transporte terrestre.



Fuente: El autor

Respecto a las regalías, se evidencia un aumento de su generación en al menos el 38% eliminando el transporte terrestre lo que implica una mejora en los impactos sociales generados por la red de distribución. La figura 49 compara los valores generados por regalías con y sin transporte terrestre, y el aumento porcentual en generación de regalías en cada escenario.

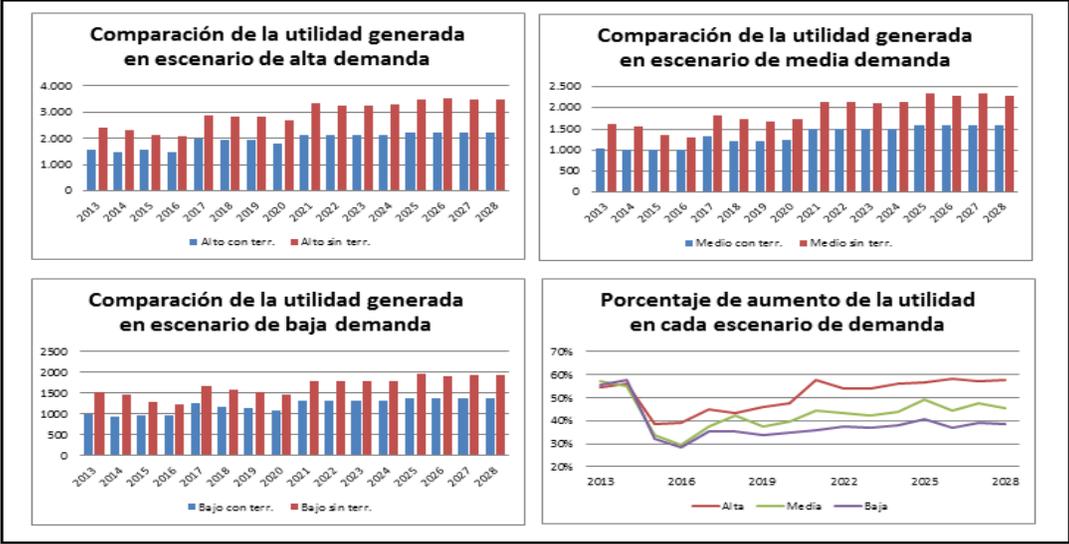
Ilustración 49 Comparativo de la generación de regalías y aumento porcentual eliminando transporte terrestre.



Fuente: El autor

La utilidad después de minimizar el transporte terrestre, generando menores emisiones de CO2 y aumentando la generación de regalías, aumentó en al menos 28% en cada año y escenario de demanda. La figura 50 muestra el comparativo de utilidades generadas.

Figura 50 Comparativo de la generación de regalías y aumento porcentual minimizando transporte terrestre.

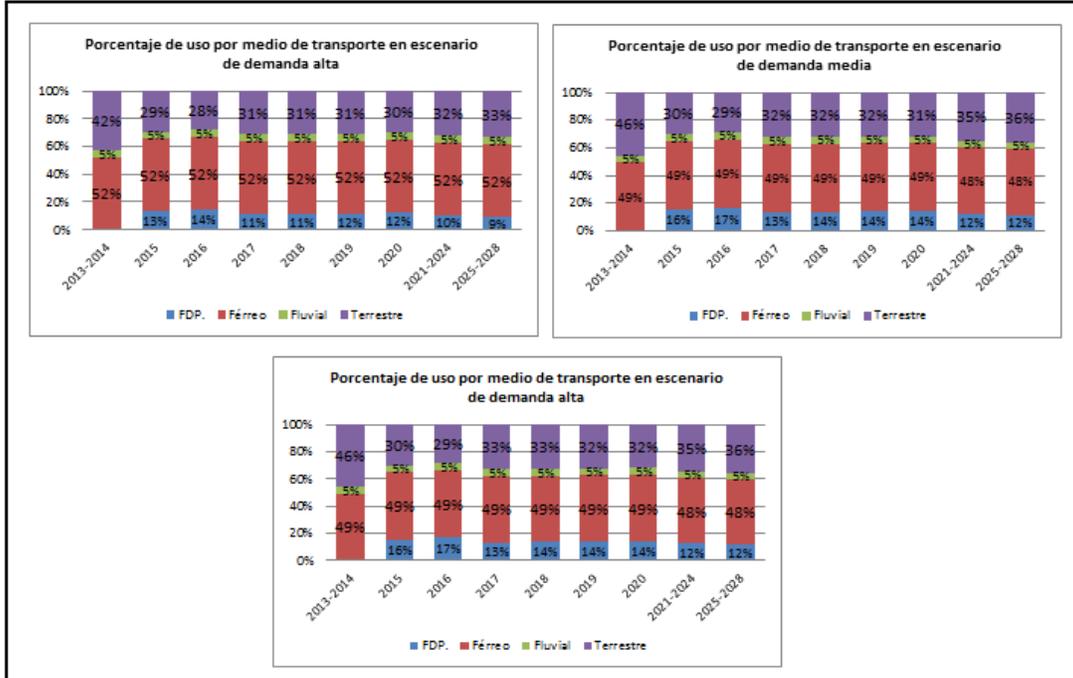


Fuente: El autor

Comparando el uso del medio terrestre, en la red de distribución inicial el volumen de carbón movilizado siempre es de al menos 28%. Con la minimización de este medio, el uso del transporte férreo es el que más aumenta principalmente en la ruta hacia el Pacífico, pues en la primera red de distribución del volumen total por el FDP no se transportaba más del 17%, con la nueva red de distribución el volumen total sube en al menos 37%.

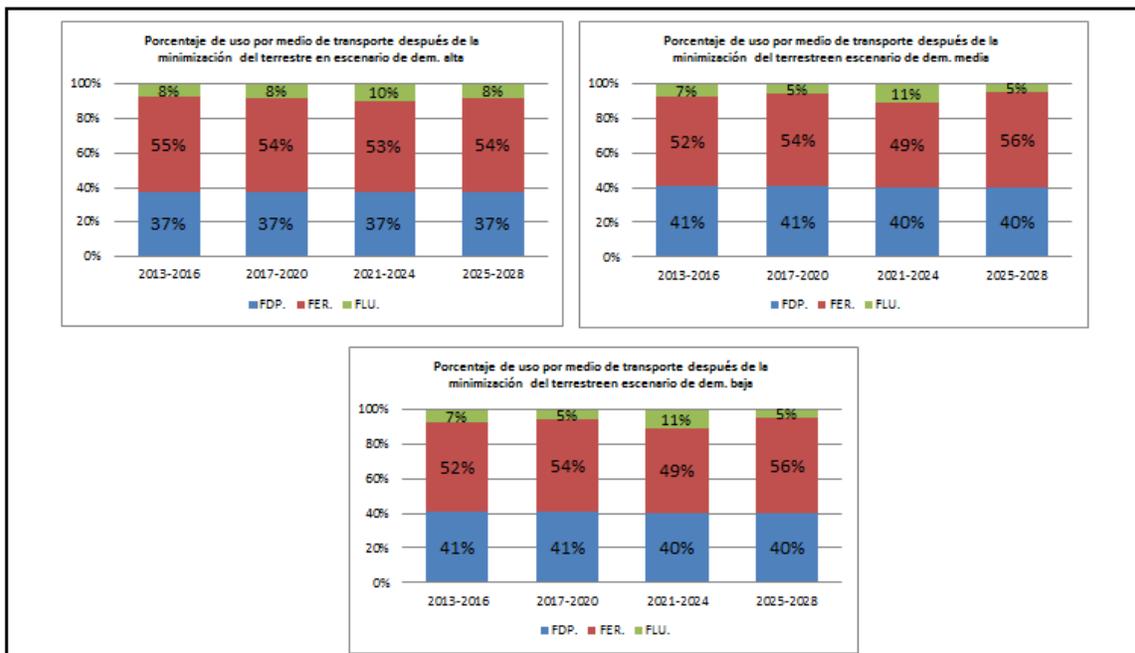
La figura 51 muestra el porcentaje de uso por medio de transporte en la red inicial y la figura 52 el incremento de otros medios minimizando el terrestre.

Figura 51 Porcentaje de uso por medio de transporte en los tres escenarios de demanda



Fuente: El autor

Figura 52 Porcentaje de uso por medio de transporte minimizando el terrestre en los tres escenarios de demanda



Fuente: El autor

4 CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Este trabajo presenta la formulación de estrategias para la distribución del carbón desde las minas de Boyacá y Cundinamarca a Puertos marítimos mediante análisis multicriterio para lograr metas en aspectos ambientales, económicos y sociales.

Inicialmente se caracterizó la red de distribución nacional de mineral extraído desde el centro del país para después realizar el planteamiento estratégico para el sistema de distribución de carbón. Posteriormente con los proyectos de infraestructura planteados se modeló la red de distribución que incluye transporte terrestre, férreo y fluvial, para después minimizar el uso del terrestre y aumentar los demás de forma que se mejoraran los impactos sociales y redujeran los ambientales.

Los resultados permiten concluir que la disminución de transporte en medio terrestre impacta positivamente generando aumento de regalías para el estado y reducción de los impactos ambientales.

Realizando una comparación para cada año y escenario, se mejora en al menos 38% los resultados iniciales de la red de distribución, sin afectar los flujos demandados para cada país. La tabla 24 muestra la diferencia en valor y la tabla 25 porcentualmente.

Tabla 24 Aumento de utilidad para la red de distribución después de la reducción de transporte terrestre.

Escenarios	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Total
Alto	840	831	593	582	882	845	891	862	1.225	1.138	1.141	1.182	1.249	1.293	1.264	1.277	16.094
Bajo	541	531	311	268	440	412	385	377	470	487	482	498	563	514	540	538	7.327
Medio	592	558	344	298	497	518	459	488	658	643	632	656	775	706	754	720	9.327

Fuente: El autor

Tabla 25 Diferencia porcentual para la red de distribución después de la reducción de transporte terrestre.

Escenario	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	Total
Alto	54%	56%	38%	39%	45%	43%	46%	47%	58%	54%	54%	56%	56%	58%	57%	58%	52%
Bajo	55%	58%	32%	28%	35%	35%	34%	35%	36%	37%	37%	38%	41%	37%	39%	39%	38%
Medio	57%	55%	34%	30%	38%	42%	38%	39%	44%	43%	42%	44%	49%	45%	48%	46%	44%

Fuente: El autor

Así mismo, que la disminución del volumen por medio terrestre es absorbida en los demás medios, principalmente el férreo hacía los países que se encuentran ubicados sobre el océano pacífico. Lo anterior debido a que la capacidad inicial de carga proyectada del FDP es insuficiente para la demanda de estos países.

Respecto a al volumen demandado por los países cuyas rutas deben hacerse por el océano atlántico, el volumen en medio férreo y fluvial aumentó menos del 10%, lo que implica que las capacidades proyectadas en estos medios podrían soportar la demanda proyectada, sin desconocer que existen oportunidades de mejora de forma que se aumenten los impactos sociales y se reduzcan los ambientales.

Los futuros trabajos permitirían:

- Analizar la red de distribución a nivel táctico y operativo, de forma que se haga mayor énfasis en los recursos y facilidades logísticas con que se contará, teniendo en cuenta que este trabajo ya abarca el nivel estratégico.
- Implementar dentro de la red de distribución la ampliación del medio de transporte fluvial pues es el más eficiente respecto al férreo.
- Implementar dentro de la red de distribución o en alguno de los eslabones planteados el uso de otros medios como bandas transportadoras y ductos, teniendo en cuenta el costo de su implementación, pues por las características del territorio Colombiano es de difícil instalación.
- Analizar el riesgo de la red de distribución, pues en este trabajo se omitieron factores como huelgas, desastres naturales y socio políticos.
- Comparar los resultados actuales con otros métodos de solución.

Bibliografía

- Haftendorn, Holz, Hirschhausen. (2012). The end of cheap coal? A techno-economic analysis until 2030 using the COALMOD-World model. *Fuel*, 305–325.
- AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. (2013). Infraestructura férrea Ramp up Carbonífero. *6° Foro sobre la Infraestructura Requerida para la Competitividad del Carbón Colombiano*, (p. 17). Paipa.
- ALAF. (2013, 6 1). *Asociación Latinoamericana de Ferrocarriles*. Retrieved from <http://www.alaf.int.ar/>
- Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., & Paksoy, T. (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers and industrial engineering*, 196-215.
- Amiri, A. (2006). Designing a distribution network in a supply chain system: formulation and efficient solution procedure. *Europe Journal Operations Research*, 567-576.
- Apergis, N., & Payne, J. (2010). The causal dynamics between coal consumption and growth: Evidence from emerging market economies. *Applied Energy*, 1972–1977.
- Arias de Greiff, G. (2013, 6 1). *AdeG ingeniería*. Retrieved from www.adeg.com.co
- AURIZON. (2013, 6 1). *Coal Loss Management Project*. Retrieved from <http://www.aurizon.com.au/INFRASTRUCTUREPROJECTS/Pages/CoalLossManagementProject.aspx>
- BANCOMUNDIAL. (2013, 6 1). *Banco Mundial*. Retrieved from www.bancomundial.org/
- Bashiri, M., Hossein, B., & Jafar, T. (2012). A new approach to tactical and strategic planning in production–distribution networks. *Applied Mathematical Modelling*, 1703–1717.
- Belanina, E. (2013). *Multimodal coal transportation in Indonesia*. Rotterdam.
- Beresford, A., Pettit, S., & Liu, Y. (2011). Multimodal supply chains: iron ore from Australia to China. *Supply Chain Management: An International Journal*, 32–42.
- Biljon, B. (2013, 6 1). *Mining weekly*. Retrieved from <http://www.miningweekly.com/article/firm-increasing-mining-transportation-efficiency-2011-01-21>
- British Petroleum. (2013, 6 1). *BP Statistical Review of World Energy 2013*. Retrieved from [BP Statistical Review of World Energy 2013: bp.com/statisticalreview](http://bp.com/statisticalreview)

- Canel, C., Khumawala, B., Law, J., & Loh, A. (2001). An algorithm for the capacitated, multi-commodity multi-period facility location problem. *Computers & Operations Research*, 411-427.
- Cardenas, M., & Reina, M. (2008). *LA MINERIA EN COLOMBIA: IMPACTO SOCIOECONÓMICO Y FISCAL*. Bogotá: FEDESARROLLO.
- Carter, J., & Ferrin, B. (1995). The impact of transportation costs on supply chain management. *Journal of business logistics*, 189-212.
- CCI. (2013, 6 1). *Informe de la Camara Colombiana de Infraestructura. Transporte Fluvial: Río Magdalena-Canal del Dique*. Bogotá.
- Crainici, T., & Kim, K. (2007). Intermodal transportation. *Handbooks in operations research and management science*, 467–537.
- Crompton, P., & Wu, Y. (2005). Energy consumption in China: past trends and future directions. *Energy economics*, 195–208.
- DECC. (2012). *DECC Fossil Fuel Price Projections*. Londres: Department of Energy & Climate Change.
- DNP. (2007). *Actualización de la cartilla "Las regalías en Colombia"*. Bogotá.
- EIA, U. (2013, 6 1). *U.S. energy information administration*. Retrieved from <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/coal.cfm>
- Ekawan, R., Duchêne, M., & Goetz, D. (2006). The evolution of hard coal trade in the Pacific market. *Energy Policy*, 1853–1866.
- Energy Watch Group. (2007). *COAL: RESOURCES AND FUTURE PRODUCTION*. Berlin. Retrieved from <http://www.energywatchgroup.org/>.
- Energy watch group. (2009). Coal is also becoming scarce. *Sun and Wind Energy*, 36-38.
- EPA, E. (1978). *Environmental Assessment of coal transportation*. Cincinnati.
- EUROSTAT. (2009). *Illustrated Glossary for Transport Statistics*. Luxemburgo: UNECE.
- Ghiani, P., Laporte, G., & Musmanno, R. (2013). *Introduction to Logistics Systems Management*. Londres: John Wiley & Sons.
- Govindaraju, V., & Foon Tang, C. (2013). The dynamic links between CO2 emissions, economic growth and coal consumption in China and India. *Applied Energy*, 310–318.
- Groothedde, B., Ruijgrok, C., & Tavasszy, L. (2005). Towards collaborative, intermodal hub networks: A case study in fast moving consumer goods market. *Transportation Research*, 567-583.

- Guillen, G., Mele, F., Bagajewicz, M., Espuña, A., & Puigjaner, L. (2005). Multiobjective supply chain design under uncertainty. *Chemical Engineering Science*, 1535-1553.
- Haftendorn, Holz, Hirschhausen. (2010). COALMOD-World: A Model to Assess International Coal Markets until 2030. *Fuel*, 305,325.
- INCONPLAN. (2011). *ESTUDIO TÉCNICO SECTORIAL "INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE MULTIMODAL Y DE LOGÍSTICAS INTEGRADAS PARA EL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA MINERA EN COLOMBIA, CON ÉNFASIS EN PUERTOS"*. Bogota.
- INVIAS. (2013, 6 1). *INSTITUTO NACIONAL DE VIAS*. Retrieved from www.invias.gov.co/
- Jayaraman, V., & Pirkul, H. (2001). Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities. *European Journal of operational research*, 394-408.
- Jeng-Wen, L., & Chia-Yon, C. (1996). A cost minimization model for coal import strategy. *Energy policy*, 1111-1117.
- Jin, q., Feng, S., Li-xin, M., & Gui-jun, T. (2009). Optimal model and algorithm for multi-commodity logistics network design considering stochastic demand and inventory control. *Systems engineering-Theory and practice*, 176-183.
- Jinke, L., Hualing, S., & Dianming, G. (2008). Causality relationship between coal consumption and GDP: Difference of major OECD and non-OECD countries. *Applied Energy*, 421-429.
- Kim, J. (2009). The Trade-off between CO2 emissions and logistics costs based on multi-objective optimization. *88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington DC.
- Latha, B., Basavarajappa, S., Kadadevaramath, R., & Chen, J. (2013). A bi objective optimization of supply chain design and distribution operation using non dominated sorting algorithm: A case study. *Expert systems with applications*, 530-539.
- Lederman, D., & Maloney, W. (2007). *Natural Resources, Neither curse nor destiny*. Washington.
- Lingaitiene, O. (2010). A mathematical model of selecting transport facilities for multimodal freight transportation. *Transport*, 10-15.
- Liu, S., & Papageorgiou, L. (2013). Multiobjective optimisation of production, distribution and capacity planning of global supply chains in the process industry. *The international journal of management science*, 369-382.
- Martínez, A., & Aguilar, T. (2013). *ESTUDIO SOBRE LOS IMPACTOS SOCIO-ECONÓMICOS DEL SECTOR MINERO EN COLOMBIA: ENCADENAMIENTOS SECTORIALES*. Bogotá.
- McCann, P. (2001). A proof of the relationship between the optimal vehicle size, haulage length and the structure of distance-transport costs. *Transportation research*, 671-693.

- Melo, M., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2006). Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computer Operation Research*, 181-208.
- MGE. (2013, 6 1). *Sector de la minería a Gran Escala*. Retrieved from <http://www.mineria-responsable.com/>
- MINMINAS. (2011, 6 1). *Modificación del regimen de distribución de regalías en Colombia*. Retrieved from http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Memorias/Memorias_2011/02-REGALIAS.pdf
- MINMINAS, M. M. (2004). *GUIA AMBIENTAL PARA EL TRANSPORTE DE CARBON*. Bogotá.
- Moncayo-Martinez, L., & Zhang, D. (2011). Multi objective ant colony optimisation: a meta-heuristic approach to supply chain design. *International journal of production economics*, 407-420.
- Network Design and transportation planning: Models and Algorithms. (1984). *Transportation Science*, 1-55.
- ONU. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climatico*. Nueva York.
- Payne, J., Apergis, N., & Loomis, D. (2010). Are fluctuations in coal consumption transitory or permanent. *Applied Energy*, 2424-2426.
- Peace, J., & Juliani, T. (2009). The coming carbon market and its impact on the American economy. *Policy and Society*, 305–316.
- Perry, G., & Olivera, M. (2009). *El impacto del petróleo y la minería en el desarrollo regional y local en Colombia*. Bogotá.
- Pisarki, A. (2008). The transportation challenge: Moving the US economy. *Cambridge systematic inc for national chamber foundation*, 212-234.
- Ramírez, M. (2008). *SOSTENIBILIDAD DE LA EXPLOTACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN* .
- Rondinelli, D., & Berry, M. (2000). Multimodal Transportation, Logistics, and the environment: Managing Interactions in a global economy. *European Management Journal*, 398-410.
- Sabri, E., & Beamon, B. (2000). A multi objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *The international journal of management science*, 581-598.
- Sahin, B., Yilmaz, H., Ust, Y., Guneri, A., & Gulsun, B. (2009). An approach for analyzing transportation costs and a case study. *European Journal of Operations Research*, 1-11.

- Sahin, B., Yilmaz, H., Ust, Y., Guneri, A., & Gulsun, B. (2009). An approach for analyzing transportation costs and a case study. *European Journal of Operations Research*, 1-11.
- Schlamadinger, B., & Marland, G. (1998). The Kyoto Protocol: provisions and unresolved issues relevant to land-use change and forestry. *Environmental Science & Policy*, 313±327.
- Sevim, H., & Sharma, G. (1991). Comparative economic analysis of transportation systems in surface coal mines. *International Journal of Surface Mining*, 17-23.
- SIMCO. (2013, 6 1). *Sistema de información minero energetica*. Retrieved from Sistema de información minero energetica: <http://www.simco.gov.co/>
- SteadieSeif, M., Dellaer, N., Nuijten, W., Van Woensel, T., & Raoufi, R. (2013). Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 1-15.
- SUPERTRANSPORTE. (2013, 6 1). *Superintendencia de Puertos y Transporte*. Retrieved from www.supertransporte.gov.co/
- Tavassy, L. (2008). Freight modeling: An overview of international experience. *40th Conference Proceedings, Transportation Research Board*. Washington.
- Tsao, J., & Lu, J. (2012). A supply chain network design considering transportation cost discounts. *Transportation research*, 400-414.
- Tsao, Y., & Lu, J. (2012). A supply chain network design considering transportation cost discounts. *Transportation research*, 401-414.
- Tsao, Y., Mangotra, D., Lu, J., & Dong, M. (2012). A continuous approximation approach for the integrated facility-inventory allocation problem. *European journal of operational research*, 216-228.
- UPME. (2012). *RESOLUCION No. 0577*. Bogotá: REPUBLICA DE COLOMBIA.
- UPME, U. (2006). *Mercado Nacional e Internacional del carbón colombiano*. Bogotá.
- UTMT, U. (2008). *MONOGRAFIA ANALISIS DE LA OFERTA Y DEMANDA DEL TRANSPORTE DE CARBON EN COLOMBIA*. Barranquilla.
- Verweij, K. (2011). *Synchronic modalities – Critical success factors*. Rotterdam: . J. van der Sterre.
- WCI. (2005). *THE COAL RESOURCE, A COMPREHENSIVE OVERVIEW OF COAL*. London.
- WEC. (2013, 6 1). *WORLD ENERGY COUNCIL*. Retrieved from <http://www.worldenergy.org/>
- WEO. (2013, 6 1). *World economic outlook*. Retrieved from <http://www.worldenergyoutlook.org/>

- Wisetjindawat, W., Yamamoto, K., & Marchal, F. (2012). A commodity distribution model for a multi-agent freight system. *Social and Behavioral Sciences* 3, 534 – 542.
- Wu, T., & Zhang, K. (2014). A computational study for common network design in multi-commodity supply chains. *Computers and operational research*, 206-213.
- Yaghini, M., & Akhavan, R. (2012). Multicommodity network design problem in rail freight transportation planning. *8th International Conference on traffic and transportation studies*. Changsha.
- Yunyi Chen, C. (2012). *The Outlook of Carbon Prices*. Groningen.
- Zaklan, A., Cullmann, A., Neumann, A., & von Hirschhausen, C. (2012). The globalization of steam coal markets and the role of logistics: An empirical analysis. *Energy Economics*, 105–116.

Anexos

Los anexos se encuentran en medio magnéticos y se ordenaron de la siguiente forma:

- 1.1 Reservas de carbón mundiales
- 1.2 Producción de carbón mundial
- 1.3 Consumo mundial del carbón
- 1.4 Precios históricos de carbón
- 2.1 Histórico de precios
- 2.2 Histórico de transporte fluvial
- 2.3 Regalías por departamento y año
- 2.4 Inversión Extranjera directa vs. Tasa representativa del mercado
- 2.5 Impactos económicos
- 3.1 Capacidades de los medio de trasporte a usar en la red de distribución
- 3.2 Distancias entre los nodos de la red de distribución
- 3.3 Demanda de países por tipo, año y escenario
- 4.1 Resultados de los impactos ambientales: Por cada eslabón se indica volumen de emisiones y valor de estas emisiones con proyectos de infraestructura iniciales.
- 4.2 Resultados de los impactos sociales-económicos con proyectos de infraestructura iniciales.
- 4.3 Resultados de la red de distribución con proyectos de infraestructura iniciales.
- 4.4 Resultados de la migración de volúmenes a otros medios de transporte minimizando el terrestre.
- 4.5 Resultados de la emisión de emisiones y valor de las emisiones, así como regalías generadas.