

**ANÁLISIS DE FLUJOS DINÁMICOS DE MATERIALES APLICADO A
LA PROYECCIÓN DE DEMANDA DE MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN EN COLOMBIA**

**DYNAMIC MATERIAL FLOWS ANALYSIS TO BUILDING MATERIALS
DEMAND PROJECTION IN COLOMBIA**

Gabriel Jaime Rivera León

Ingeniero Industrial

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS
MEDELLÍN, COLOMBIA

2015

**ANÁLISIS DE FLUJOS DINÁMICOS DE MATERIALES APLICADO A
LA PROYECCIÓN DE DEMANDA DE MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN EN COLOMBIA**

**DYNAMIC MATERIAL FLOWS ANALYSIS TO BUILDING MATERIALS
DEMAND PROJECTION IN COLOMBIA**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería Administrativa

Gabriel Jaime Rivera León

Ingeniero Industrial

Directora:

Yris Olaya Morales, PhD

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

MEDELLÍN, COLOMBIA

2015

A la memoria de Daniela Cano y Jorge Iván González. La muerte no llega con la ausencia. Quien permanece en nuestra memoria y en nuestro corazón, a pesar de la ausencia, nunca morirá.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional y el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) y su programa Jóvenes Investigadores por financiar la presente tesis.

A YRIS OLAYA MORALES, Ph.D Profesora Asociada de la Universidad Nacional de Colombia, directora de esta investigación, por sus valiosas asesorías y aportes que ayudaron a culminar satisfactoriamente este trabajo.

A Jessica, Luisa, Juan Felipe, Carla, Juan Pablo y Juan Esteban quienes con sus aportes y ayuda contribuyeron al desarrollo de esta investigación.

Tabla de contenido

Introducción.....	8
1. El problema de los flujos de materiales de construcción en Colombia.....	10
1.1 El problema objeto de estudio	10
1.2 Delimitación del sistema.....	16
1.3 Justificación	17
1.4 Objetivos.....	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
2. Caracterización del uso de materiales de construcción en Colombia	19
2.1 Materiales de construcción	19
2.2 Sistemas constructivos usados en Colombia	19
2.2.1 Participación y consumo de materiales de construcción por sistema constructivo	21
2.2.2 Área construida por sistema constructivo.....	22
2.3 Tiempo de vida medio de las edificaciones	25
3. Estudios sobre el sector de la construcción en Colombia	28
3.1 Estudios econométricos	28
3.2 Análisis de flujos de materiales bajo el enfoque de metabolismo urbano y social	32
4. Metodología	37
4.1 Análisis de Flujos de Materiales	37
4.2 Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales.....	40
4.3 Dinámica de Sistemas	41
5. Modelo de Flujos de Materiales de Construcción en Colombia	42
5.1 Modelo Dinámico de la Construcción de Viviendas en Colombia.....	44
5.2 Formulación del modelo	46
5.3 Validación y calibración del modelo	51
5.3.1 Validación del modelo.....	51
5.3.2 Calibración del modelo.....	54
6. Resultados	57
6.1 Análisis del caso base	57
6.1.1 Condiciones iniciales caso base.....	58
6.1.2 Resultados del modelo en el caso base.....	60
6.2 Análisis de escenarios	65

6.2.1	Predominio del sistema de construcción industrializado.....	66
6.2.2	Cambios en el crecimiento económico.....	67
6.2.3	¿Qué pasa si el área por vivienda responde a una distribución de probabilidad?.....	71
6.2.4	Impactos ambientales en los flujos de materiales de construcción de vivienda en Colombia.....	74
7.	Discusión de Resultados.....	77
8.	Conclusiones	78
	Referencias	79
	Anexo A: soporte de las pruebas de validación del modelo.....	87
	Anexo B: formulación del modelo de para el caso base en Powersim.....	97

Lista de figuras

Figura 1: Cadena de valor del sector de la construcción.	10
Figura 2: Crecimiento poblacional en Colombia 2000-2020.	11
Figura 3: Variación del PIB vs variación del PIB de la construcción. Precios constantes, año 2005.	14
Figura 4: Empleo directo en sector de la construcción.....	15
Figura 5: Resumen ruta metodológica de la investigación.....	37
Figura 6: Esquema conceptual de MFA para el modelo de stocks dinámicos de materiales de construcción.	42
Figura 7: Flujos dinámicos de materiales de construcción en áreas urbanas.	45
Figura 8: Comportamiento de las licencias aprobadas; históricos y simulados.	56
Figura 9: Comportamiento del área finalizada por año; históricos y simulados.	57
Figura 10: Proyecciones del pib per cápita. Fuente: FMI	59
Figura 11: Proyecciones de la población en Colombia. Fuente: DANE	59
Figura 12: Entradas netas de materiales al sistema: caso base	63
Figura 13: Licencias aprobadas para el caso base: 2013-2062.....	64
Figura 14: Área total construida para el caso base: 2013-2062.....	64
Figura 15: Área total disponible para el caso base: 2013-2062.....	65
Figura 16: Participación, sistemas constructivos.....	66
Figura 17: Entradas netas de materiales al sistema. Caso base (esc base) vs escenario 1 (esc 1).	67
Figura 18: Consumo de materiales en cada uno de los escenarios de crecimiento del PIB	69
Figura 19: Licencias aprobadas para construcción de vivienda en cada uno de los escenarios de crecimiento del PIB.	70
Figura 20: Área total construida en cada uno de los escenarios de crecimiento del PIB.	70
Figura 21: Área disponible en cada uno de los escenarios de crecimiento del PIB.	71
Figura 22: Área total construida cuando el área por vivienda es: constante (esc base) vs cuando se modela como una normal (esc al).....	72
Figura 23: Área disponible cuando el área por vivienda es: constante (esc base) vs cuando se modela como una normal (esc al).....	73
Figura 24: Comportamiento del área disponible, según el método de integración usado.	91
Figura 25: Comportamiento del área total construida, según el método de integración usado.....	91
Figura 26: Área disponible para construcción de vivienda, cuando la vida útil de las viviendas es 61, 40 y 20 años respectivamente.	92
Figura 27: Área en expansión variando el área por vivienda; 55, 85 y 115 metros cuadrados.....	92
Figura 28: Déficit de vivienda, variando el área por vivienda; 55, 85 y 115 metros cuadrados.....	94
Figura 29: Área disponible cuando el PIB crece con porcentajes entre el 0,5 % y el 6%.	95

Figura 30: Licencias aprobadas cuando el PIB crece con porcentajes entre el 0,5 % y el 6%.....	95
Figura 31: Consumo de materiales de construcción cuando el PIB crece con porcentajes entre el 0,5 % y el 6%.....	90

Lista de tablas

Tabla 1. Resumen de los principales subsidios y políticas públicas que en materia de vivienda se han implementado en el período 2009-2014.....	12
Tabla 2. Consumo de materiales de construcción, según la técnica de constructiva usada.....	19
Tabla 3. Consumo de materiales, según sistema constructivo usado, en kg/m ²	21
Tabla 4. Área iniciada de vivienda, total nacional para 12 áreas urbanas y tres metropolitanas, año 2012.	23
Tabla 5. Área construida de vivienda por sistema constructivo 2004-2013.....	24
Tabla 6. Resumen de los tiempos de vida medio de edificaciones hallados en diferentes estudios.....	26
Tabla 7. Resumen y descripción de estudios econométricos sobre el sector de la construcción en Colombia.	28
Tabla 8. Resumen, descripción de estudios sobre flujos de materiales y metabolismo urbano, realizados en Colombia a 2014.	33
Tabla 9. Resumen estudios realizados en otros países sobre MFA aplicado a la demanda de materiales a 2014.....	35
Tabla 10. Tipos de MFA y problemas de interés asociados.....	39
Tabla 11. Resumen modelo en formulación del modelo en powersim.	46
Tabla 12. Resultados, calibración de parámetros	56
Tabla 13. Valores iniciales de las variables y parámetros más importantes, en el caso base.....	58
Tabla 14. Balance de materiales de construcción en millones de toneladas, obtenido a partir del modelo en el caso base, para el período 2013-2062.	61
Tabla 15. Participación de los sistemas constructivos en el caso base (esc base) y en el escenario 1 (esc 1).	66
Tabla 16. Escenarios de crecimiento para el PIB per cápita colombiano. Años 2013-2062.....	68
Tabla 17. Consumo de materiales para cada escenario del PIB considerado, en millones de toneladas.....	68
Tabla 18. Pruebas de bondad-de-ajuste para área/vivienda. Prueba de kolmogorov-smirnov.....	71
Tabla 19. Parámetros del modelo	88
Tabla 20. Variables exógenas	89
Tabla 21. Valores de las variables exógenas	90
Tabla 22. Formulación en powersim del modelo	97

Resumen

El presente estudio desarrolla un modelo de simulación en dinámica de sistemas como complemento a un modelo análisis de flujos de materiales desarrollado por Müller (2006), con el objetivo de proyectar demanda futura de materiales de construcción a partir del análisis de flujos pasados de materiales y de los stocks de materiales.

La dinámica de los flujos de materiales de construcción de viviendas está dada por; licencias de construcción aprobadas, las técnicas de construcción usadas y la intensidad en el uso de los materiales en cada una de las técnicas. Las licencias de construcción aprobadas dependen del PIB per cápita, para el cual se toman las proyecciones del FMI para Colombia, en pesos constantes del año 2005.

Las técnicas constructivas más usadas en Colombia son: Mampostería Confinada, con un consumo promedio de materiales de $2.407,3 \text{ Kg/m}^2$, Mampostería Estructural y el Sistema Industrializado con un consumo $1.378,5$ y de 1.269 Kg/m^2 , respectivamente. Los materiales más usados en los próximos años serán los agregados triturados, con un consumo de 503 millones de toneladas a 2062, seguido de la arena de río con 496 millones de toneladas.

Palabras Claves: Flujos de Materiales, Análisis de Flujos de Materiales, Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales, Dinámica de Sistemas, Modelamiento, Metabolismo Urbano, Técnicas Constructivas, Demanda de Materiales, Sector de la Construcción.

Abstract

This study, is a simulation model building in systems dynamic was developed to complement a model of material distribution with the objective being the projection of future construction material demand deduced from past material distribution pattern and material stock analysis.

The dynamic of home construction material distribution is determined by: construction license approval, construction techniques used, and use of materials required by each technique. The construction license approval depends on GDP per capita which is determined by the IFM projections for Colombia in fixed pesos (not accounting for inflation). The construction techniques most commonly used in Colombia are: confined masonry with average material consumption rate of 2,407.3 kilograms per square meter structural masonry, and the industrialized system with a consumption rate of 1,378.5 and 1,269 kilograms per square meter respectively. The materials most frequently used in the coming years will be crushed aggregate with a consumption rate of 496 million tons.

Keywords: **Material Flow**, Material Flow Analysis, Dynamic Flow Analysis, Systems Dynamic, Modeling, Urban Metabolism, Building Materials, Building Techniques, Urban Dynamic.

Introducción

El sector de la construcción tiene un papel importante en el desempeño de las economías del mundo, particularmente de las naciones en desarrollo. La infraestructura facilita el comercio de productos, el abastecimiento de insumos y la construcción de infraestructura es una fuente de trabajo y progreso social. En particular, la construcción de viviendas permite satisfacer una de las necesidades básicas más apremiantes en los países en desarrollo (Blanco, 2013).

De modo que, el sector de la construcción es un sector muy dinámico. Por un lado, el uso intensivo de mano de obra no calificada y de insumos industriales de producción nacional hacen que los ciclos del sector de la construcción tiendan a reflejarse plenamente en el PIB y el empleo (Cárdenas & Hernández, 2006). Por el otro, los encadenamientos hacia atrás amplifican el impacto macroeconómico de la construcción. Se espera que la demanda de edificaciones en Colombia continúe creciendo durante los próximos años, debido al crecimiento poblacional, al déficit de vivienda y políticas públicas que se han implementado en materia de vivienda. Así mismo, se espera que este crecimiento de la demanda de edificaciones e infraestructura impulse la demanda de materiales de construcción.

Teniendo en cuenta la importancia de contar con un suministro de materiales confiable, económico y con bajos impactos ambientales, surge la necesidad de analizar la dinámica de los Flujos de Materiales de construcción de viviendas en Colombia, como una forma de detectar patrones de consumo y problemas de abastecimiento.

Si bien, al momento de realizarse esta investigación, existen estudios públicos disponibles acerca del comportamiento del sector construcción en Colombia, estos se enfocan en estudiar los determinantes de la actividad constructora desde el punto de vista econométrico o solo se limitan a realizar las cuentas de materiales de construcción y/o desechos para ciudades como Bogotá y Medellín.

Como respuesta a lo anterior, y con el fin de comprender el comportamiento de la demanda de materiales de construcción, en este trabajo, se desarrolla un modelo de Flujos Dinámicos de Materiales, basado en el modelo de Análisis de Flujos de Materiales desarrollado por Müller (Müller D. , 2006). El modelo de flujos dinámicos de materiales desarrollado se complementa con un modelo de simulación en Dinámica de Sistemas. De esta forma, se puede analizar la dinámica del flujo de materiales de construcción en Colombia, en el mediano y largo plazo, considerando los flujos de residuos y patrones de consumo.

En cuanto al uso de la metodología de análisis de flujos de materiales para el sector de la construcción, se han encontrado estudios de Análisis de Flujos de Materiales para algunos materiales y regiones específicas. A continuación, se describen los relacionados con Colombia.

Por ejemplo, Alfonso & Pardo (2014), aplican el enfoque de metabolismo urbano para contabilizar los flujos de materiales y energía a través de la ciudad de Bogotá (Colombia), donde analizan las entradas, acumulaciones dentro de la ciudad y salidas como desechos y/o residuos, con el objetivo de determinar las relaciones entre la

demanda de materiales, energía y el impacto ambiental que esta genera. Por su parte, West & Schandl (2013), construyeron una base de datos con información de los flujos de materiales de 22 países de Latinoamérica y el caribe, incluyendo a Colombia, para el período 1970-2008. En el plano local, esta Ott (2006), quien realiza un análisis de flujos de materiales para los materiales secundarios de construcción (desechos), específicamente concreto y ladrillo, usando un modelo dinámico en Excel, para Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

En el caso de Vallejo, Pérez, & Martínez-Alier (2011), aplican el enfoque de metabolismo social, construyen una base de datos con las cuentas de los flujos de materiales en la economía colombiana para el período 1970-2007, emplean indicadores de flujo de materiales directos para analizar la dimensión ecológica de la actividad económica colombiana.

En su mayoría, los estudios anteriores se limitan a identificar y analizar la acumulación histórica de estos flujos. En ninguno de los estudios encontrados se analiza el comportamiento futuro de estos flujos para Colombia. Verbigracia, Ott (2006) solo se limita a analizar los flujos de materiales secundarios para Medellín y el área metropolitana; el Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales propuesto en este trabajo combina Análisis de Flujos de Materiales y Técnicas de Simulación, con el fin de estudiar el comportamiento futuro de los flujos de materiales en Colombia.

La presente investigación se compone de siete apartados: el primero, presenta una breve introducción al problema objeto de estudio, se delimita el sistema y se establecen el objetivo general y específico. El segundo, describe los métodos constructivos y materiales usados en Colombia y el tiempo de vida de las edificaciones. El tercero revisa los estudios sobre el sector de la construcción en Colombia, encontrados en la literatura. El cuarto, describe la metodología usada en la investigación. Por su parte, el quinto, contiene el modelo de flujos de materiales desarrollado para el caso colombiano, como la calibración y la validación del modelo desarrollado. En el sexto, se presentan los resultados arrojados por el modelo para el caso base y para los escenarios definidos. Y en el último lugar, se presentan las conclusiones, las referencias y los anexos.

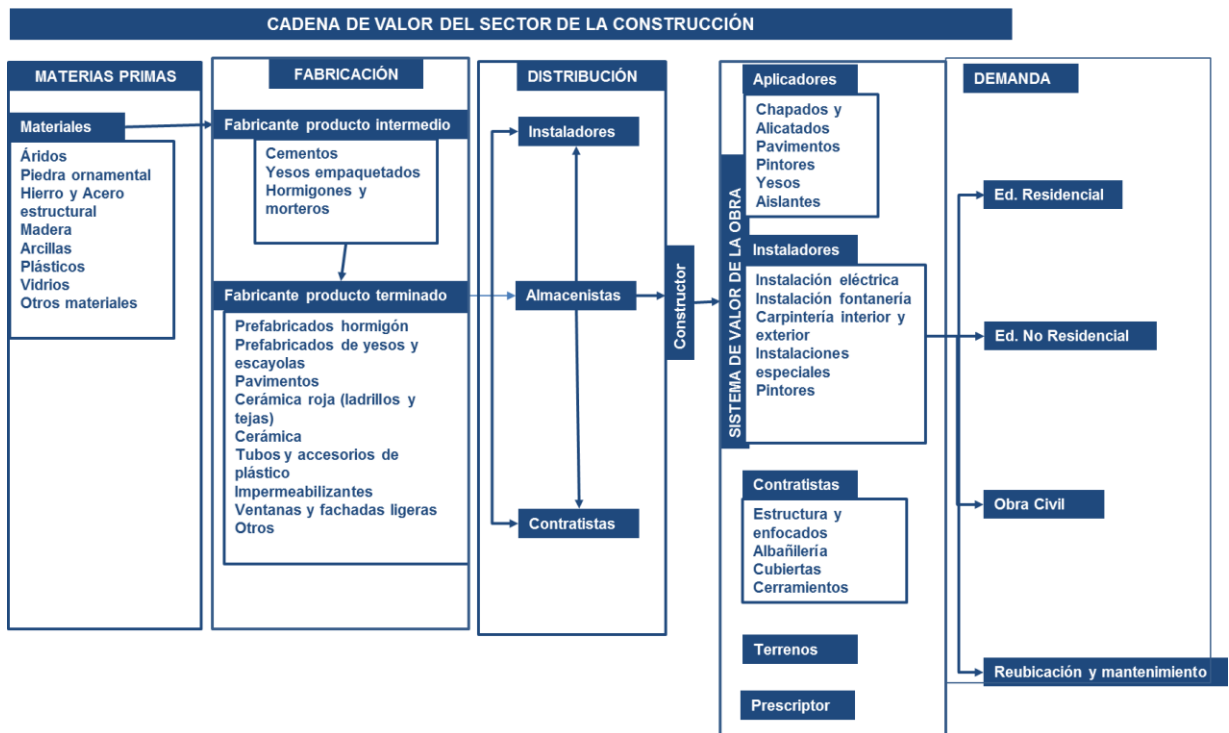
1. El problema de los flujos de materiales de construcción en Colombia

En este apartado de la investigación, se introduce al problema objeto de estudio, se delimita y definen los objetivos que se implementó en la investigación.

1.1 El problema objeto de estudio

La industria de la construcción está constituida por un gran número de actividades entre las que se encuentran la producción de materias primas y su comercialización para construcción de inmuebles residenciales, comerciales o de grandes obras de infraestructura. Como se muestra en la Figura 1, en la cadena de valor de la construcción, se extrae una variedad de materiales y se procesan con el fin de satisfacer la demanda de edificaciones.

Figura 1: Cadena de Valor del sector de la construcción.



Fuente: Elaboración propia, a partir de; Instituto Tecnológico de la Construcción, Observatorio del mercado de la construcción. España. Consultado mayo de 2013. Disponible en línea: <http://omcv.aidico.es/descargas/documentacion/OMC.pdf>

Como se verá más adelante, en Colombia existe un déficit cuantitativo y cualitativo de vivienda que ha llevado a los gobiernos recientes a desarrollar políticas públicas de vivienda. Se espera entonces un incremento en la demanda de materiales de construcción para los próximos años, de ahí la importancia de contar con una metodología adecuada que permita determinar las necesidades futuras de materiales.

Si bien, se han realizado estudios sobre la dinámica del sector construcción en general, en Colombia, en la actualidad no existe un diseño metodológico que nos permita calcular los flujos de materiales a través del sector e identificar riesgos y oportunidades en cuanto al suministro de estos materiales.

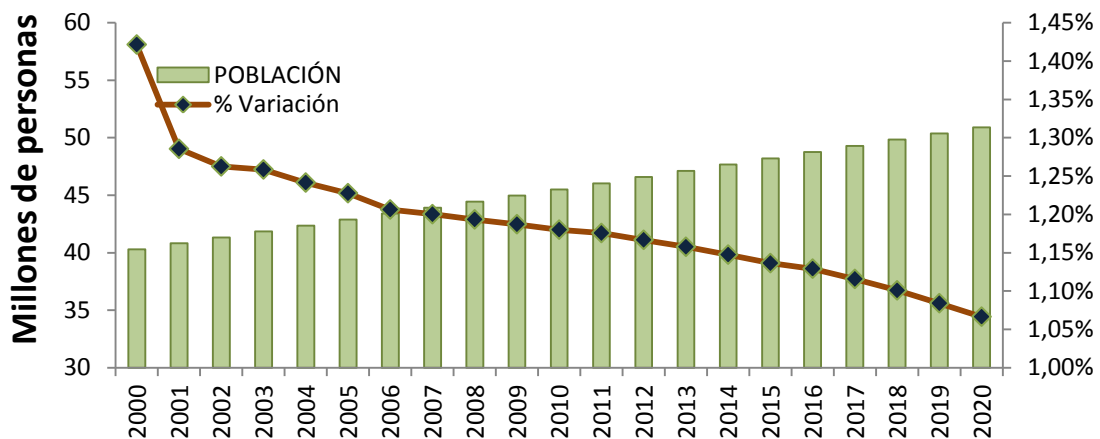
Déficit de vivienda

Según (DANE, 2008), se presenta déficit de vivienda cuando existen hogares que “habitan en viviendas particulares que presentan carencias habitacionales tanto por déficit cuantitativo como cualitativo y por tanto requieren una nueva vivienda o mejoramiento o ampliación de la unidad habitacional en la cual viven”, este déficit es cuantitativo cuando no existe “una relación uno a uno entre las viviendas adecuadas y los hogares que necesitan alojamiento, es decir, se basa en la relación entre el número de hogares y el número de viviendas apropiadas existentes” y es déficit cualitativo cuando “las viviendas particulares, presentan carencias habitacionales en atributos referentes a la estructura, espacio, y a la disponibilidad de servicios públicos domiciliarios, y por lo tanto requieren mejoramiento o ampliación”.

Según el último Censo General, realizado en Colombia por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en el año 2005, en Colombia se presentaba un déficit cuantitativo de 1.307.757 viviendas, y un déficit cualitativo de 2.520.298 viviendas (DANE, 2005). Estas cifras según el Departamento Nacional de Planeación y el DANE, a 2012 eran del 554.087 viviendas para el déficit cuantitativo y de 1.093.066 viviendas para el déficit cualitativo, producto de las políticas de vivienda que ha implementado el gobierno (Minvivienda, 2014).

Al déficit existente de vivienda en Colombia, se suma el hecho que para los próximos años la población Colombiana tiende a aumentar, y aunque la tasa de crecimiento de la población tiende a disminuir, pasando de un incremento del 1.42 en el año de 2000 al 1.07% en año 2020, como se muestra en el gráfico 5, la población tiende a aumentar, situándose a 2020 por encima de los 50 millones de habitantes.

Figura 2: Crecimiento Poblacional en Colombia 2000-2020.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Censo general 2005 (DANE). Datos actualizados a mayo de 2011.

Políticas públicas de vivienda

Las políticas de vivienda implementadas por el gobierno Colombiano desde 2009 hasta 2013, se resumen en la tabla 1. Allí se puede observar políticas públicas que otorgan estímulos a la demanda de viviendas nuevas por medio de la reducción de tasas de interés y el subsidio a la cuota inicial de las viviendas. Recientemente, se introdujo una política de asignación de viviendas gratis a familias en extrema pobreza; esta política es un estímulo a la oferta.

Tabla 1. Resumen de los principales subsidios y políticas públicas que en materia de vivienda se han implementado en el período 2009-2014.

Subsidios y políticas de vivienda en Colombia			
Tipo de política	Período de Aplicación	Cupos	Descripción
Subsidio a la tasa de interés, definido mediante el decreto 1143 de 2009.	Abril 1 de 2009 a junio 30 de 2010	32.000 cupos: 4000 cupos para viviendas con un precio de hasta 70 SMMLV, 10.000 para viviendas de entre 70 y 135 SMMLV, 9.000 para viviendas de entre 135 y 235 SMMLV, y 9.000 para viviendas de entre 235 y 335 SMMLV.	Resolución 954 del ministerio de hacienda, del 17 de abril de 2009: Viviendas nueva con un valor de: - hasta 135 SMMLV: subsidio de 5 puntos porcentuales de la tasa de interés del crédito -entre 135 y 235 SMMLV: subsidio de 4 puntos porcentuales de la tasa de interés del crédito-entre 235 y 335 SMMLV: subsidio de 3 puntos porcentuales sobre la tasa de interés del crédito.
Ampliación de los cupos definidos en la resolución 954 de 2009.	Abril 1 de 2009 a junio 30 de 2010	Amplió los cupos de 32.000 a 47.000: 9.500 cupos para viviendas con un precio de hasta 70 SMMLV, 13.000 para viviendas de entre 70 y 135 SMMLV, 12.500 para viviendas de entre 135 y 235 SMMLV, y 12.000 cupos para viviendas de entre 235 y 335 SMMLV.	Resolución 1707 del ministerio de hacienda, del 26 de junio de 2009: Viviendas nueva con un valor de: - hasta 135 SMMLV: subsidio de 5 puntos porcentuales de la tasa de interés del crédito -entre 135 y 235 SMMLV: subsidio de 4 puntos porcentuales de la tasa de interés del crédito-entre 235 y 335 SMMLV: subsidio de 3 puntos porcentuales sobre la tasa de interés del crédito.
Ampliación de los cupos definidos en la resolución 1707 de 2009.	Abril 1 de 2009 a junio 30 de 2010	Amplió los cupos de 47.000 a 56.400, para viviendas de 70 SMMLV se pasó de 9.500 a 12.700 cupos, y para viviendas de entre 70 y 135 SMMLV se pasó de 13.000 a 19.200 cupos.	Resolución 3177 del ministerio de hacienda, del 12 de noviembre de 2009: Viviendas nueva con un valor de: -hasta 135 SMMLV: subsidio de 5 puntos porcentuales de la tasa de interés del crédito -entre 135 y 235 SMMLV: subsidio de 4 puntos porcentuales de la tasa de interés del crédito-entre 235 y 335 SMMLV: subsidio de 3 puntos porcentuales sobre la tasa de interés del crédito.

Subsidios y políticas de vivienda en Colombia			
Tipo de política	Período de Aplicación	Cupos	Descripción
Ampliación de los cupos definidos en las resoluciones 954, 1707 y 3177 de 2009.	Abril 1 de 2009 a diciembre 31 de 2011	71.800 cupos, repartidos de la siguiente manera: 14.800 cupos para viviendas con un precio de hasta 70 SMMLV, 30.700 para viviendas de entre 70 y 135 SMMLV, 13.500 para viviendas de entre 135 y 235 SMMLV, y 12.800 para viviendas de entre 235 y 335 SMMLV.	Resolución 1139 del ministerio de hacienda, del 22 de abril de 2010: Viviendas nuevas con un valor de: - hasta 135 SMMLV: subsidio de 5 puntos porcentuales de la tasa de interés del crédito -entre 135 y 235 SMMLV: subsidio de 4 puntos porcentuales de la tasa de interés del crédito-entre 235 y 335 SMMLV: subsidio de 3 puntos porcentuales sobre la tasa de interés del crédito.
100 mil viviendas gratis.	2012-2014	100.000 viviendas gratis. Para familias con nivel 1 del Sisbén, damnificadas por el invierno, desplazadas, madres cabeza de hogar y adultos mayores que estén registrados en la Red Unidos.	Mecanismo de subastas para otorgar los contratos a constructores y de sorteo para asignar las viviendas a los beneficiarios. Pagos a constructores de forma contra entrega. Hasta junio de 2015 se habían construido 80.362 de estas viviendas, las que no habían sido adjudicadas estaban en proceso de adjudicación (Minvivienda).
Política de vivienda planteada en el marco del Plan de Impulso a la Productividad y el Empleo (PIPE), lanzado en 2013.	Abril 15 de 2013	86.000 cupos para compra de vivienda de interés prioritario (VIP).	Subsidio tanto en la cuota inicial del crédito como en la tasa de interés. Dirigido a familias con ingresos de entre 1 y 2 SMMLV.
		74.948 cupos para compra de vivienda de interés social (VIS).	Subsidio a la tasa de interés (2,5 puntos porcentuales).
		30.471 cupos para viviendas con precios de entre 135 y 335 SMMLV.	Subsidio a la tasa de interés (2,5 puntos porcentuales).

Fuente: Elaboración propia, a partir de (Clavijo & Salcedo, 2012; Minvivienda, 2014; Minhacienda, 2009; Minhacienda, 2009; Minhacienda, 2009; Minhacienda, 2010).

Participación de la construcción en la economía de Colombia

El sector constructor demanda un uso intensivo de mano de obra, principalmente mano de obra no calificada, y de insumos industriales de producción nacional; con lo cual contribuye en la disminución de los índices de desempleo y en el crecimiento de otros sectores de la economía.

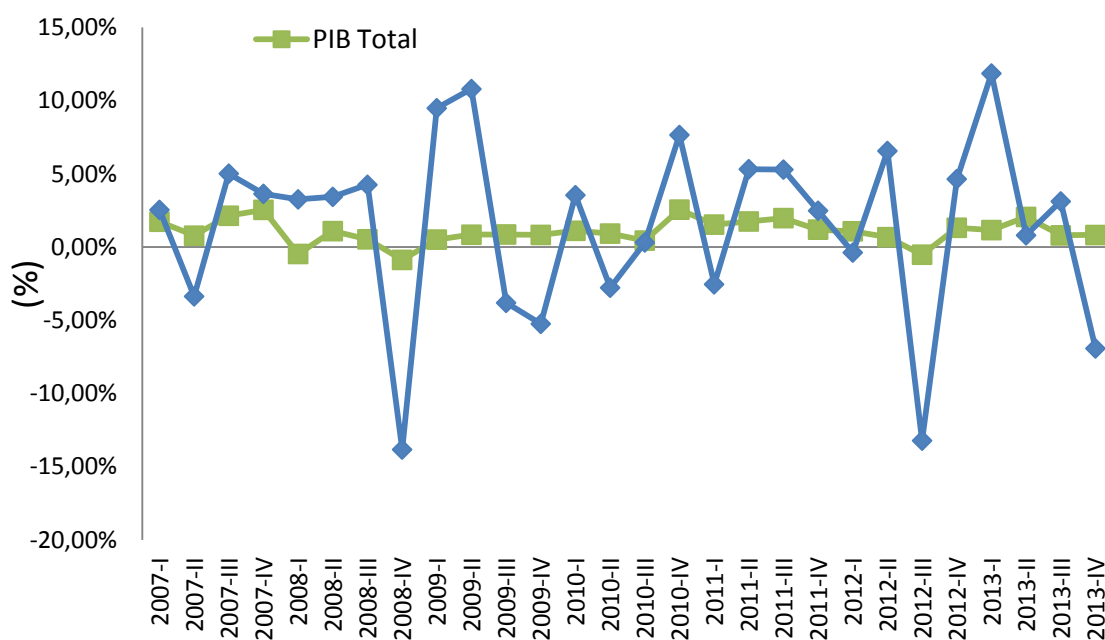
En Colombia, el PIB de la construcción está compuesto por las actividades relacionadas con la construcción de edificaciones y por las relacionadas con la Ingeniería Civil, las primeras agrupan el valor agregado de la construcción de edificaciones residenciales (tanto a nivel urbano como rural), edificios no residenciales, reparación de edificios y mantenimientos, y alquiler de equipos de construcción, mientras que las segundas

abarcan la construcción de carreteras, vías férreas, puertos y tuberías (Cárdenas & Hernández, 2006).

En la Figura 3, se muestran las variaciones trimestrales tanto del PIB como del PIB de la construcción, para el período comprendido entre el primer trimestre de 2007 y el cuarto trimestre de 2013. Como se observa en la figura, el PIB de la construcción presenta picos y valles a lo largo del período considerado, con caídas del 13.83% en el último trimestre de 2008 y del 13.22%, el tercer trimestre de 2012, y con picos de crecimiento del 10.79%, el segundo trimestre de 2009 y del 11.85%, el primer trimestre de 2013.

Como resultado de las variaciones del PIB de la construcción, la participación del PIB de la construcción en el PIB total ha estado entre el 5.5 y el 8%, para el período comprendido entre primer trimestre de 2006 y cuarto trimestre de 2012 (DANE, 2013). Este comportamiento es diferente del PIB total, el cual no ha sufrido muchas variaciones en el período considerado; la caída más grande fue del 0.88% y se dio el cuarto trimestre de 2008, y el crecimiento más grande se dio el cuarto trimestre del 2010, con el 2.55%.

Figura 3: Variación del PIB vs Variación del PIB de la Construcción. Precios constantes, año 2005.



Fuente: DANE, marzo de 2014.

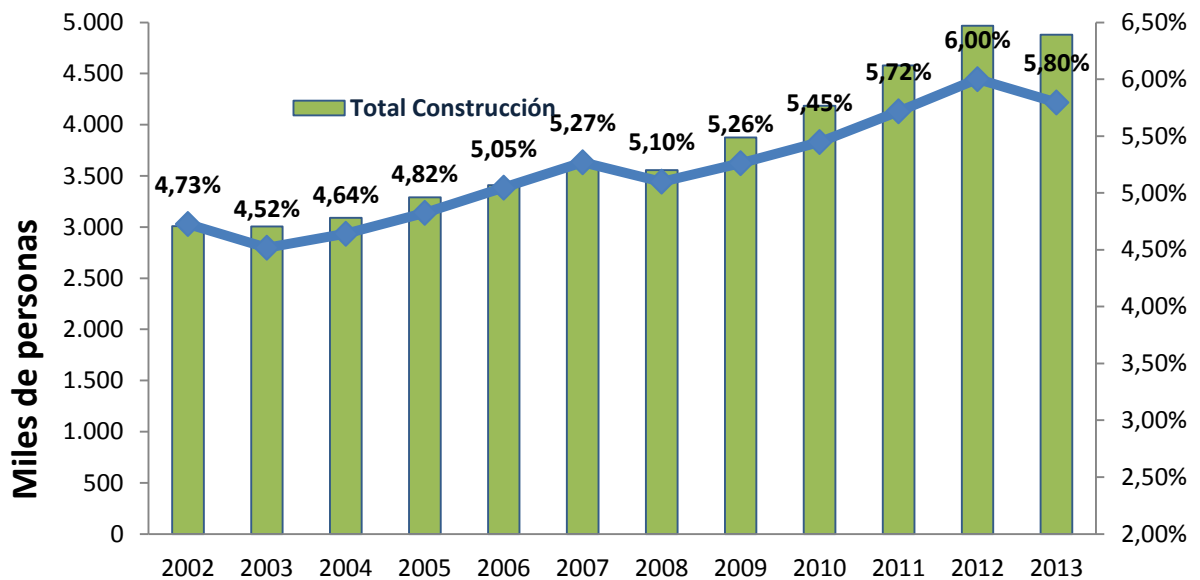
El sector de la construcción y el empleo

El sector de la construcción, tiene una incidencia directa en el comportamiento del mercado laboral, a través de la demanda de trabajadores no calificados. En la Figura 4, se muestra las cifras de empleo del sector de la construcción, del período comprendido entre 2002 y 2013, la participación de estas sobre el total de empleados en Colombia. Estas cifras muestran que la participación del sector de la construcción sobre el número

total de empleados a nivel nacional ha seguido una tendencia de crecimiento, con tasas entre el 4.7 y el 6%, a excepción de los años 2008 y 2013; cuando se presentó una leve disminución de cerca del 0.2 puntos porcentuales en la participación del empleo del sector de la construcción sobre el empleo total. Estas caídas se pueden explicar por el hecho de que el sector de la construcción genera una gran cantidad de empleos temporales y una caída en el comportamiento del sector se ve reflejada en el comportamiento del empleo.

De la Figura 4, también tenemos que para el período considerado el empleo del sector de la construcción aumenta su participación en el empleo total, pasando del 5% a una participación de alrededor del 6%, y se espera que esta tendencia de crecimiento continúe en los próximos años, como resultado de las políticas públicas que se han implementado y se siguen implementando en el país en materia de vivienda e infraestructura.

Figura 4: Empleo directo en sector de la construcción.



Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del DANE. *Datos parciales año 2013, al III trimestre del año.

Demanda de materiales de construcción

La demanda se define como la cantidad de bienes y servicios que pueden ser adquiridos a los diferentes precios del mercado por un consumidor o un conjunto de consumidores en un momento dado. Sin embargo, la cantidad demandada no está determinada solamente por el precio del bien o servicio, sino que también por los gustos o preferencias de cada consumidor; por la disponibilidad de información; por los precios de los otros bienes; por los ingresos; por las normas y regulaciones del gobierno, etc. (ONU-HABITAD, 2006).

Respecto a las políticas públicas mencionadas, en Colombia se implementan políticas de vivienda que dinamizan el sector de la construcción. Los subsidios otorgados por el estado generan una demanda para el sector constructor, pues se dirigen exclusivamente a viviendas nuevas. La construcción de viviendas para satisfacer esta demanda, genera unas necesidades de materiales de construcción, objeto de estudio de nuestra investigación.

Para los constructores y para las empresas proveedoras de insumos, es necesario contar con una cadena de abastecimiento que garantice el suministro de estos materiales en el momento en el cual sean requeridos, puesto que resulta muy costoso e inconveniente tener un inventario de materiales durante un largo tiempo. Para garantizar este suministro, es necesario que las empresas proveedoras de insumos para construcción cuenten con una estimación de la demanda de materiales de este sector. El estudio de esta demanda, es el objeto de esta investigación.

1.2 Delimitación del sistema

La presente investigación, se centra en el estudio de la demanda agregada de materiales de construcción de vivienda en Colombia a partir del análisis de los flujos de materiales, analiza las entradas al sistema, acumulaciones en forma de edificaciones e infraestructura y salidas al medio, ya sea cómo residuos o como materiales secundarios sujetos de ser reutilizados. Por lo tanto, el objeto de estudio, es el sistema económico colombiano, centrándonos particularmente en el sector de la construcción y dentro de este sector específicamente, la construcción de viviendas. La realización del estudio, consideró las áreas urbanas de Bogotá, Cali, Barranquilla, Pereira, Armenia, Cartagena, Ibagué, Manizales, Villavicencio, Neiva, Pasto y Popayán; y las áreas metropolitanas; Medellín, Bucaramanga y Cúcuta; Poblaciones distinguidas por concentrar cerca del 76% de la población colombiana que vive en áreas urbanas a 2014 (Banco Mundial, 2014). Además, las áreas urbanas seleccionadas son consideradas por el DANE en el Censo de Edificaciones, una de nuestras fuentes de información.

1.3 Justificación

Este estudio sirve para determinar el comportamiento del consumo de materiales de construcción en Colombia, como una forma de evaluar estrategias que garanticen el suministro de estos en el tiempo. Por lo cual, el modelo desarrollado contribuye a la toma de decisiones a nivel gubernamental, en el planteamiento de políticas públicas y a las empresas pertenecientes al sector de la construcción de viviendas; es decir, da señales sobre el comportamiento del consumo de materiales de construcción de viviendas en Colombia.

Cabe anotar que, hasta el momento, no se han detectado estudios técnicos e investigaciones científicas en el país que traten el tema del comportamiento del consumo de materiales de construcción de viviendas en el tiempo. A nivel general, se han encontrado trabajos que analizan el comportamiento del mercado de viviendas usando herramientas macroeconómicas y otros que cuantifican los flujos de materiales y desechos para ciudades como Bogotá, Medellín y Cali.

En otras palabras, en ninguno de los estudios encontrados enmarcados en la temática de materiales en Colombia, evalúan el comportamiento futuro de los flujos de materiales de construcción de vivienda; por lo tanto, el modelo creado permite evaluar estos flujos futuros, lo cual sirve para detectar problemas de abastecimiento y evaluar políticas que permitan garantizar el suministro de estos materiales.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un método para proyectar la demanda de materiales de construcción en Colombia, usando técnicas de simulación y de análisis de flujos de materiales.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar las principales variables que determinan la actividad de construcción en Colombia en el corto, mediano y largo plazo.
- Recopilar información histórica del comportamiento de la construcción y de la producción y consumo de materiales de construcción en Colombia.
- Caracterizar el uso de materiales de construcción en Colombia teniendo en cuenta el tipo de construcción.
- Identificar los elementos de la metodología de análisis de flujos de materiales que pueden ser simulados.
- Construir, calibrar y validar un modelo de simulación que permita estimar la demanda de materiales de construcción a partir de los flujos de estos.
- Ajustar el modelo de simulación al caso Colombiano y realizar simulaciones bajo distintos escenarios.

2. Caracterización del uso de materiales de construcción en Colombia

Este capítulo, contiene la caracterización de los materiales de construcción más usados en Colombia, las técnicas constructivas empleadas y el uso de los materiales dependiendo de cada técnica constructiva. Esta caracterización es importante porque permite calcular, según la técnica constructiva usada en una vivienda y el área construida, las cantidades de materiales que se usan en la construcción de una vivienda y a partir de esta información, estimar la demanda de materiales de construcción para la construcción de viviendas.

El capítulo está organizado de la siguiente forma: primero se hace una revisión de cuáles son los materiales más usados, luego de las técnicas constructivas y por último, con el fin de conocer cómo es la generación de residuos del sector, se analiza la vida útil de las edificaciones.

2.1 Materiales de construcción

Los materiales de construcción son aquellos que se usan en las obras arquitectónicas o de ingeniería, sin importar su naturaleza. Estos se pueden clasificar, de acuerdo a diferentes criterios, siendo los más habituales su origen, su uso y su función en la obra (Blanco, 2013) (Diaz & Ramirez, 2011).

Sin importar que técnica de construcción se utilice, los agregados gruesos y finos son los productos más empleados en la construcción de vivienda. En la tabla 4, se muestra que, en conjunto, cinco materiales representan alrededor del 99% del peso de una obra. Estos materiales son: Agregados gruesos y finos, el Cemento Portland, la roca muerta y tierra de excavación, la Cerámica cocida y el Acero. El 1% restante está representado por materiales como vidrio, PVC, cobre, madera, pinturas, tejas de fibrocemento, entre otros.

Tabla 2: Consumo de materiales de construcción, según la técnica de constructiva usada.

Sistema Constructivo	Agregados gruesos y finos	Cemento Portland	Roca muerta-Tierra de excavación	Cerámica cocida	Acero	Total	Otros (Madera, Cobre, Pinturas, Tejas de fibrocemento, Cemento blanco)
Industrializado	77,31%	12,73%	3,21%	3,47%	2,33%	99,05%	0,95%
Mampostería Estructural	53,53%	9,83%	11,51%	22,73%	1,49%	99,09%	0,91%
Mampostería Confinada	56,44%	12,72%	15,47%	14,87%	0,39%	99,89%	0,11%

Fuente: Elaboración propia a partir de (Salazar, 2013).

2.2 Sistemas constructivos usados en Colombia

Las técnicas de construcción son el conjunto de procedimientos y métodos de construcción que permiten construir una edificación determinada, garantizando como resultado que el usuario obtenga un espacio habitable adecuado, organizado y seguro. Estas técnicas determinan los flujos de materiales que se presentan a través del sector de la construcción, según la técnica constructiva se usan ciertos materiales y en ciertas cantidades específicas.

En Colombia, el DANE, de acuerdo al código de sismo resistencia colombiano (NSR-2010), clasifica los sistemas constructivos de la siguiente forma:

- Mampostería confinada
- Mampostería estructural
- Sistema industrializado
- Otros sistemas

Mampostería confinada: *“conformada por muros contruidos con ladrillos pegados con mortero, confinados por columnas y vigas en concreto fundidas en sitio. Es un sistema sobre el cual existe amplia experiencia constructiva en Colombia y cuenta con un buen soporte experimental y analítico. Es apto para construcciones en altura hasta unos seis pisos”* (Castaño B. E., 2011).

Mampostería estructural: *“se fundamenta en la construcción de muros con piezas de mampostería de perforación vertical, unidas por medio de mortero, reforzadas internamente con barras y alambres de acero, cumpliendo los requisitos de análisis, diseño y construcción apropiados establecidos en la NSR - 2010. Este sistema permite la inyección de todas sus celdas con mortero de relleno o inyectar sólo las celdas verticales que llevan refuerzo”* (Castaño B. E., 2011).

“La construcción se realiza por medio de procedimientos y actividades tradicionales de mampostería, aunque los muros pueden prefabricarse formando paneles” (Castaño B. E., 2011).

Sistema industrializado: Sistema constructivo basado en el diseño de producción mecanizado de componentes y subsistemas elaborados en serie que, tras una fase de montaje, conforman todo o una parte de un edificio o construcción. En un edificio prefabricado, las operaciones en la obra son esencialmente de montaje y no de elaboración (Aguiló & Fernández, 1974).

La construcción industrializada es un sistema de construcción, cuyo diseño de producción es mecanizado, en el que todos los subsistemas y componentes se han integrado en un proceso global de montaje y ejecución para acelerar su construcción.

Los sistemas constructivos más usados en la construcción de vivienda en Colombia, según las ciudades censadas por el DANE, con datos del año 2012, son: mampostería confinada 66%, mampostería estructural 10%, y el sistema industrializado con muros y lozas de concreto 23%. Estos sistemas constructivos abarcan cerca del 99% de todas las construcciones. Mientras que el denominado “otros sistemas constructivos”, alcanza una participación en todas la ciudades, inferior al 1%.

Es importante resaltar que, a pesar de las diferencias que se presentan entre las regiones del país en cuanto a clima, tipos de suelo y recursos naturales, para cualquier lugar del país se usan los mismos sistemas constructivos y estos a su vez usan casi los mismos tipos de materiales, y en cantidades similares. Aunque, en algunas regiones del país, se presenta un incremento en el uso de cerámica cocida, para sistemas de mampostería y de agregados triturados, para el sistema industrializado (Salazar, 2013).

2.2.1 Participación y consumo de materiales de construcción por sistema constructivo

Luego de identificar los sistemas constructivos más representativos en Colombia. A continuación, se muestran los materiales de construcción que se usan en cada uno de ellos, el consumo de materiales en cada sistema constructivo y los porcentajes que representan cada uno sobre el total de materiales que componen una obra.

Tabla 3. Consumo de materiales, según sistema constructivo usado, en Kg/m².

MATERIALES	SISTEMAS CONSTRUCTIVOS					
	Industrializado		Mampostería Estructural		Mampostería Confinada	
	Kg/m ²	%	Kg/m ²	%	Kg/m ²	%
Agregados triturados	542,19	42,72%	404,05	29,31%	624,99	25,96%
Arena de río	445,21	35,08%	349,09	25,32%	733,63	30,48%
Cemento Gris	156,74	12,35%	138,78	10,07%	306,12	12,72%
Roca Muerta-Tierra excavación	46,6	3,67%	152,24	11,04%	372,52	15,47%
Cerámica Cocida	39,98	3,15%	301,28	21,86%	358,08	14,87%
Acero	26,68	2,10%	20,31	1,47%	9,44	0,39%
Madera	5,02	0,40%	3,58	0,26%	0,13	0,01%
Teja Fibrocemento	3,15	0,25%	5,92	0,43%		
PVC	2,35	0,19%	2,06	0,15%	2,39	0,10%
Cobre	0,42	0,03%	0,13	0,01%		
Cemento Blanco	0,37	0,03%	0,48	0,03%		
Pinturas	0,32	0,03%	0,55	0,04%		
TOTALES	1269	100,00%	1378,47	100,00%	2407,3	100,00%

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de (Salazar, 2013).

De la Tabla 3, tenemos que, por cada m² construido bajo el sistema constructivo industrializado, se requieren en total de 1269,03 kilogramos de material; bajo el sistema constructivo mampostería estructural se requieren 1378,47 kilogramos; y finalmente, bajo el sistema mampostería confinada se requieren 2407,3 kilogramos. Estas cifras nos muestran que el sistema constructivo que presenta un mayor uso de material es el sistema mampostería confinada, y el que menos material demanda es el sistema industrializado, esta información es relevante a la hora de contabilizar los residuos y/o desechos que se generan al construir una edificación usando cada uno de los sistemas constructivos.

Los agregados triturados son el tipo de material más usado tanto para el sistema industrializado, como para el sistema mampostería estructural. Para construir un m² de una edificación bajo el sistema industrializado, se requieren 542,19 kilogramos de agregados triturados; mientras que para construir un m² de una edificación bajo el sistema mampostería estructural, se requieren 404,05 kilogramos de agregados triturados. Aunque por cada m² construido, mediante el sistema mampostería confinada se requiere 624,99 kilogramos de agregados triturados, cifra mayor a la requerida por los otros dos sistemas constructivos, el material más usado en este sistema es la arena de río, puesto que para construir un m² bajo este sistema, se requieren 733,63 kilogramos de este material.

De la Tabla 3, también tenemos que tres materiales representan cerca del 90% del peso de una obra construida bajo el sistema constructivo industrializado. Estos materiales y su participación son: Agregados triturados con el 42,72%, Arena de río con el 35,08%, Cemento Gris con el 12,35%. Los tres materiales que representan el 9% restante son: Roca muerta-tierra de excavación con el 3,67%, Cerámica cocida con el 3,15% y Acero con el 2,1%. Los materiales restantes representan en conjunto solo el 1% del peso de una obra y son: Teja de Fibrocemento con el 0,25%, Madera con el 0,40%, PVC con el 0,19%, Cobre con el 0,03%, Cemento Blanco con el 0,03% y Pinturas con el 0,03%.

Cinco materiales representan cerca del 98% del peso de una obra construida bajo el sistema Mampostería Estructural: los agregados triturados con un 29,31%, la arena de río con un 25,32%, la cerámica cocida con un 21,86%, la roca muerta con un 11,04% y el cemento gris con un 10,07%. Si se compara con el Sistema Industrializado, en el sistema Mampostería Estructural se incrementa el uso de los materiales cerámica cocida y roca muerta-tierra de excavación. Los materiales restantes, en conjunto, representan solo el 2%.

Cinco materiales representan alrededor del 99,5% del peso de una obra construida, bajo el sistema constructivo mampostería confinada: agregados triturados con el 25,96%, arena de río con el 30,48%, cemento gris con el 12,72%, roca muerta-tierra de excavación con el 15,47% y cerámica cocida con el 14,87%. Los materiales restantes en conjunto, solo representan el 0,5% de una obra construida bajo este sistema.

Finalmente, tenemos que, independiente del sistema constructivo que se use en la construcción de una obra, alrededor del 99% del peso de una obra está concentrado en cinco materiales de construcción: agregados triturados, arena de río, cemento gris, roca muerta-tierra de excavación y cerámica cocida, los materiales restantes solo representan alrededor del 1%.

2.2.2 Área construida por sistema constructivo

El área total construida es definida por el DANE de la siguiente forma: “Corresponde al metraje total del destino encontrado en proceso. El área construida, incluye únicamente los espacios cubiertos, sean comunes o privados de las edificaciones”¹. Estos datos nos dan una visión del comportamiento del sector en general y del uso de los sistemas constructivos en los últimos 10 años, en Colombia.

En la Tabla 4, se muestran datos sobre el área construida total en cada sistema constructivo, y su distribución entre las doce áreas urbanas y tres metropolitanas consideradas por el DANE en el censo de edificaciones.

¹ http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/construccion/ficha_vis_no_vis.pdf

Tabla 4. Área iniciada de vivienda, total nacional para 12 áreas urbanas y tres metropolitanas, año 2012.

ÁREA	Área construida (m ²) total nacional, doce áreas urbanas y tres metropolitanas Año 2012					
	Sistemas constructivos					
	Mampostería Estructural	Mampostería Confinada	Sistemas Industrializados	Otros sistemas	Total por ciudades	Porcentaje por ciudades
Urbana de Bogotá	591,629	1,990,298	1,147,784	15,900	3,745,611	36.87%
Metropolitana de Medellín	60,101	1,464,818	485,437	15,645	2,026,001	19.94%
Urbana de Cali	130,984	370,681	400,154	625	902,444	8.88%
Urbana de Barranquilla	50,057	558,180	54,132	167	662,536	6.52%
Metropolitana de Bucaramanga	930	608,693	5,604	0	615,227	6.06%
Urbana de Pereira	14,659	98,445	64,379	0	177,483	1.75%
Urbana de Armenia	8,404	70,874	34,710	15,935	129,923	1.28%
Urbana de Cartagena	16,236	185,915	0	96	202,247	1.99%
Urbana de Ibagué	30,644	236,091	8,100	160	274,995	2.71%
Metropolitana de Cúcuta	15,193	203,960	15,125	7,670	241,948	2.38%
Urbana de Manizales	14,650	97,598	21,420	585	134,253	1.32%
Urbana de Villavicencio	0	380,472	0	0	380,472	3.75%
Urbana de Neiva	62,610	180,537	86,451	181	329,779	3.25%
Urbana de Pasto	450	139,625	14,046	15,911	170,032	1.67%
Urbana de Popayán	13,163	125,438	3,842	23,058	165,501	1.63%
Total por sistema constructivo	1,009,710	6,711,625	2,341,184	95,933	10,158,452	
Porcentaje por sistema constructivo	9.94%	66.07%	23.05%	0.94%		100.00%

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos del Censo de Edificaciones-CEED del DANE.

Los datos de la Tabla 4, corresponde a datos del Censo de Edificaciones-CEED del DANE, series; anexos_Itrim12 del 8 de marzo de 2012, anexos_IItrim12 del 4 de junio de 2012, anexos_IIItrim12 y anexos_IVtrim12, del 3 de diciembre de 2012, consultadas el 20 de septiembre de 2013.

Para el año 2012, según los resultados de la Tabla 4, para las doce áreas urbanas y tres metropolitanas consideradas por el DANE, el sistema constructivo más usado en cada una de las áreas consideradas fue el sistema constructivo mampostería confinada, con cerca del 66% de participación, sobre el total de las construcciones realizadas en el

periodo considerado. Bogotá, Medellín y Cali son las ciudades que mayor área construida presentan en este período. Cerca del 66% del área construida en este período, está en estas tres ciudades; el 36,87% en Bogotá, el 19,94% en Medellín y el 8,88% en Cali. Estas cifras son consistentes con la creciente urbanización que ha presentado el país en las últimas décadas. Adicionalmente, tenemos que las doce áreas urbanas y tres metropolitanas consideradas por el DANE, representan el 86,2% del área construida en Colombia.

En la Tabla 5, se muestra el comportamiento histórico de los últimos 10 años del área construida de vivienda en Colombia, según cada sistema constructivo. Según estos datos tenemos que, el sistema constructivo más usado, para todos los años es mampostería confinada, seguido en unos casos por el sistema mampostería estructural (años 2004, 2005, 2006, 2007 y 2009), y en otros casos por el sistema industrializado (2010, 2011, 2012, 2013). El sistema industrializado ha ganado participación en los últimos años, a expensas del sistema mampostería estructural. Adicionalmente, tenemos que en el año 2008 la participación de los sistemas constructivos: industrializado y mampostería estructural fue muy similar.

Tabla 5. Área construida de vivienda por sistema constructivo 2004-2013.

AÑO	Área construida (m ²)						
	Mampostería Estructural (m ²)	Mampostería Estructural (%)	Mampostería Confinada (m ²)	Mampostería Confinada (%)	Sistemas Industrializados (m ²)	Sistemas Industrializados (%)	Total por año (m ²)
2004	1,376,555	30.20%	2,728,579	59.85%	453,657	9.95%	4,558,791
2005	1,979,262	29.96%	3,706,548	56.10%	921,482	13.95%	6,607,292
2006	1,872,344	25.72%	4,362,356	59.93%	1,044,709	14.35%	7,279,409
2007	2,103,983	25.99%	4,728,112	58.40%	1,264,212	15.61%	8,096,307
2008	1,194,892	18.14%	4,235,801	64.31%	1,155,635	17.55%	6,586,328
2009	857,617	16.30%	3,878,228	73.71%	525,651	9.99%	5,261,496
2010	1,155,531	17.07%	4,055,598	59.92%	1,557,017	23.01%	6,768,146
2011	1,464,489	17.03%	5,242,549	60.98%	1,890,542	21.99%	8,597,580
2012	856,764	10.43%	5,161,989	62.87%	2,192,200	26.70%	8,210,953
2013	613,280	12.28%	2,811,000	56.29%	1,569,597	31.43%	4,993,877

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos del Censo de Edificaciones-CEED del DANE, consultado el 20 de agosto de 2014.

Los datos de la Tabla 5 corresponden a datos del Censo de Edificaciones-CEED del DANE, series; estructura_series_ceed_IVtrim13 del 7 de marzo de 2014, anexos_Itrim06, anexos_IItrim06, anexos_IIItrim06, anexos_IVtrim06, anexos_Itrim07, anexos_IItrim07, anexos_IIItrim07, anexos_IVtrim07, anexos_Itrim08, anexos_IItrim08, anexos_IIItrim08, anexos_IVtrim08, anexos_Itrim09, anexos_IItrim09, anexos_IIItrim09, anexos_IVtrim09, anexos_Itrim10, anexos_IItrim10, anexos_IIItrim10, anexos_IVtrim10, anexos_Itrim11, anexos_IItrim11, anexos_IIItrim11, anexos_IVtrim11, anexos_Itrim12, anexos_IItrim12, anexos_IIItrim12, anexos_IVtrim12, anexos_Itrim13, anexos_IItrim13, anexos_IIItrim13, anexos_IVtrim13, consultadas el 20 de agosto de 2014.

A pesar de los avances tecnológicos que se han logrado en los últimos años, en las técnicas constructivas, ha permitido diferentes usos y aplicaciones de los materiales de construcción, las técnicas constructivas y los componentes básicos de las edificaciones no han cambiado, tal como se evidencia en la Tabla 5. En los últimos 10 años, se han implementado las mismas técnicas constructivas; sin embargo, en los últimos cinco años, se observa que el sistema industrializado ha venido ganando terreno situándose por encima del sistema constructivo mampostería estructural, lo cual puede ser explicado por la tendencia que se ha venido presentando en las principales ciudades de construir cada día menos casas y más edificios, como una forma de optimizar el uso del suelo.

2.3 Tiempo de vida medio de las edificaciones

Como hemos visto hasta ahora, las edificaciones están constituidas por una serie de materiales constructivos, que dependiendo de las técnicas usadas, conforman los diferentes sistemas que componen un edificio. Los edificios a su vez, tienen una vida limitada dado que, con el tiempo, dejan de cumplir sus funciones.

Una vez llega a su fin la vida útil de un edificio, el final de este es la demolición total o parcial, con el objetivo de realizar un recambio de edificios en el primer caso, y de rehabilitarlos en el segundo. Esto se produce para algunos edificios, antes de los 50 años de vida, oscilando según (González, 2005), entre los 47 y 75 años de antigüedad.

Cuando se habla de vida útil de una construcción, se debe tener en cuenta que cada uno de los materiales que conforman la construcción tiene su propia vida útil y que a su vez la vida útil de la construcción es el resultado de la vida útil de sus componentes. Sin embargo, dado que la vida útil de los materiales de construcción es mayor que la vida útil de los edificios, para efectos prácticos y siguiendo la metodología de (Müller D. , 2006), se considera que ningún material es retirado del edificio antes de que este llegue a su vida útil, con lo cual la vida útil de los materiales que componen las edificaciones es igual a la vida útil de estas.

La vida útil de una edificación es el tiempo que se estima un bien prestará el servicio para el cual fue creado, dentro de los límites de eficiencia económica. La ASTM E 632 – 82, define la vida útil de la siguiente manera: “es el periodo de tiempo después de la construcción durante el cual, todas las propiedades esenciales alcanzan o superan el valor mínimo aceptable con un mantenimiento rutinario” (ASTM, 1988). Mientras que la vida útil ponderada de la edificación es el promedio de vida, que se obtiene en función de la incidencia o participación de los componentes más representativos de la obra, de manera que el promedio ponderado de la vida útil de todos los materiales de la construcción, representa la vida útil total estimada del edificio, y la vida útil esperada de un edificio es una suposición sobre la vida útil esperada, basada en la experiencia (González, 2005).

En el marco de la investigación realizada, se ha determinado que a nivel mundial el estudio y estimación de las vidas útiles de los bienes ha sido y es un tema en el cual cada día más organismos e investigadores se han involucrado. Para el caso particular de

la vida útil de las edificaciones, en algunos estudios, como los que se muestran en la **Tabla 6**, se ha detectado que los tiempos de vida de las edificaciones, según la región objeto de estudio, presentan un ajuste a distintas distribuciones de probabilidad.

Tabla 6. Resumen de los tiempos de vida medio de edificaciones hallados en diferentes estudios.

Autor	Lugar del Estudio	Conclusiones
Müller, D. B., Cao, J., Kongar, E., Altonji, M., Weiner, P.-H., & Graedel, a. T. (2007).	New Haven (Connecticut) USA	La vida promedio de un edificio se puede explicar mediante una distribución lognormal. Y se puede esperar que las edificaciones tengan una vida útil promedio de entre 100 y 150 años.
Gleeson (1985)	Indianapolis USA	Encontró una vida media de 99,6 años
Johnstone (2001)	Indianapolis USA	Utilizando los mismos datos del estudio anterior, encuentra que la vida útil de los edificios está entre 96 y 118 años.
Komatsu, Y., Kato, Y., Yoshida, T., & Yashiro, T. (1992).	Japón	Encontraron vidas medias de entre 28 a 41 años para los diferentes tipos de edificios en Japón. Los edificios comerciales parecían tener una vida más corta que las viviendas. Sin embargo, estas cifras deben ser utilizadas con cuidado, ya que se aplican principalmente a las casas japonesas tradicionales, en un período histórico anterior.
Sartori, I., Bergsdal, H., Müller, D. B., & Brattebø, H. (2008)	Noruega	Consideran un período medio de renovación de 40 años y una vida media de 100 años para las edificaciones.

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 6, tenemos que la estimación de la vida útil de las edificaciones y de los materiales de construcción en general, ha sido un tema de investigación poco tratado en Colombia. Hasta el momento, no se han detectado estudios técnicos e investigaciones científicas que traten el tema de la vida útil de las edificaciones como un conjunto en Colombia. Aunque se han encontrado estudios a nivel internacional (Tabla 6), que tratan el tema de la vida útil de las edificaciones, estos estudios corresponden a países como USA, Japón y Noruega, los cuales presentan condiciones ambientales y/o climatológicas, además de técnicas de construcción muy diferentes a las que se presentan en Colombia.

Por su parte, González (2005), realiza una estimación de la vida útil ponderada de edificaciones para el caso de Costa Rica, tomando como referencia datos del estudio realizado para Venezuela por Caputto et. al (2000). Teniendo en cuenta que a la fecha no se encuentran estudios públicos sobre la vida útil de las edificaciones en Colombia, y que tanto Costa Rica como Venezuela presentan características similares a Colombia, en cuanto a condiciones climáticas, materiales y técnicas constructivas, se toman como referencia los resultados sobre la vida útil ponderada de las edificaciones obtenidos por estos autores.

Asimismo, González (2005), partiendo del hecho de que la vida útil de los materiales que componen un edificio no puede exceder la vida útil del edificio, analiza la vida útil de cada material presente en una edificación y teniendo en cuenta el peso de cada material en la construcción y los usos a los cuales se ven, o se verán sometidos los edificios a largo de su vida útil, realiza una ponderación de las vidas útiles de los materiales de construcción usados en un edificio para obtener un estimado de la vida útil de todo el edificio. De esta forma, encuentra que la vida útil ponderada de las edificaciones está entre 47 y 75 años, dependiendo de las condiciones de uso a la que sea expuesta la edificación en el tiempo.

Para concluir, este apartado realizado sobre la caracterización del uso de materiales de construcción en Colombia, se puede decir que las principales técnicas de construcción más usadas en el país son: Mampostería Confinada, Mampostería Estructural y Sistema Industrializados. Del total de las viviendas construidas en Colombia, el 66% son bajo el sistema Mampostería Confinada, el 23% bajo el sistema industrializada, y 10% bajo el sistema Mampostería Estructural; es decir, el total estos métodos constructivos abarca el 99% de las construcciones.

En cuanto al consumo de materiales tenemos que el Sistema Mampostería confinada, es el sistema que más intensidad en el uso de materiales presenta, con 2.407 kg/m^2 construido. Le siguen el sistema de mampostería estructural con $1.378,47 \text{ Kg/m}^2$ construido, mientras el sistema industrializado, es el sistema que menor uso de materiales demanda, con 1269 Kg/m^2 construido.

3. Estudios sobre el sector de la construcción en Colombia

El presente apartado, contiene la revisión de los estudios encontrados en la investigación sobre el comportamiento del sector de la construcción en Colombia. La mayoría de los estudios encontrados son estudios econométricos, en donde se evalúa el comportamiento del sector, desde el punto de vista de la oferta y la demanda, de una forma agregada. Sin embargo, más recientemente se encontraron estudios a partir del año 2006, en donde se ha tratado de contabilizar los flujos de materiales de construcción y desechos, teniendo en cuenta el enfoque de metabolismo urbano para ciudades como Bogotá y Medellín.

3.1 Estudios econométricos

En Colombia, se han encontrado estudios econométricos de los principales determinantes de la actividad constructora en Colombia desde la oferta y la demanda agregada. Estos estudios tienen en común que usan como variable para medir la actividad constructora las licencias aprobadas de construcción de vivienda, para cuales se identifican unos determinantes y usando técnicas de pronóstico se evalúa el comportamiento futuro del mercado de edificaciones en mencionado país.

En la Tabla 7, se muestra un resumen de los principales estudios encontrados en Colombia, sobre el comportamiento del sector de la construcción y sus determinantes. En esta tabla, en particular, se muestra un resumen de los principales hallazgos reportados en cada uno de estos.

Tabla 7. Resumen y descripción de estudios econométricos sobre el sector de la construcción en Colombia.

Título	Autor	Publicación	Metodología	Resultados
Notas sobre Algunos Aspectos del Mercado de las Edificaciones en Colombia	Herrera, Santiago.	Revista Camacol, N. 41. 1988.	Variable dependiente: licencias de construcción aprobadas (m ²). Variables independientes: crédito para financiación de vivienda, crecimiento del PIB per cápita, precio relativo de la vivienda y tasa de interés real.	Modelo con ecuaciones de oferta y demanda para estimar los determinantes económicos del precio de la vivienda en Colombia.
Dinámica de la construcción entre 1950 y 1991	Díaz, J, F Gaitán, G. Piraquive, M. Ramírez y P. Roda	Planeación y Desarrollo, V. 24. 1993.	Variable dependiente: licencias de construcción aprobadas (m ²). Variables independientes: PIB total, PIB sector de la construcción, crédito doméstico.	El crédito genera efecto positivo sobre las licencias de construcción, y este efecto es significativo. El desempeño del PIB total, determina el desempeño del sector constructor.

Título	Autor	Publicación	Metodología	Resultados
La edificación y la política macroeconómica	Junguito, R, E. López, M. Misas y E. Sarmiento.	Borradores de Economía No. 41. Banco de la República de Colombia. 1995.	Modelos econométricos de oferta y demanda. Variables con las que se mide la actividad constructora: licencias de construcción (m ²) y crédito de vivienda. Variables independientes: inflación, PIB, tasa real de cambio y la liquidez total de la economía. Modelo ARIMA para las Licencias de construcción.	1. El mayor impulso a la construcción se da por el impulso de la economía agregada. 2. El descenso en la actividad constructora se puede asociar, en una magnitud importante, al comportamiento del PIB. 3. Si el país mantiene tasas de crecimiento superiores al 5% anual, el crecimiento en las licencias de construcción lo harán de un 10% a un 12%
Auge y Crisis de la Construcción en Colombia: Causas y Consecuencias	Cárdenas, M. y Raquel Bernal.	Revista Camacol, V.21, N.1, marzo. 1997.	Variables con las que se mide la actividad constructora: licencias de construcciones aprobadas, despachos de cemento, cartera total a los constructores. Variables independientes: crédito doméstico, tasa de interés real y flujos de capital.	1. El crédito doméstico y los flujos de capital presentan una relación positiva con el desempeño de la actividad constructora. 2. La tasa de interés real se destaca como uno de los determinantes más importantes del ciclo de la construcción en Colombia.
La vivienda en Colombia: determinantes socio-económicos y financieros	Clavijo, S, M. Janna y S. Muñoz.	Borradores de Economía No. 300. Banco de la República.	Variable dependiente: licencias de construcción (m ²). Variables independientes para la demanda: precio de la vivienda, ingreso de los hogares, tasa de desempleo, tasa de interés hipotecaria índice de la bolsa. Variables independientes para la oferta: precio de la vivienda, índice de costos de la construcción de vivienda, DTF real (como costo de oportunidad).	La demanda de vivienda nueva en Colombia, teniendo como variable dependiente los metros cuadrados edificados según licencias es: altamente elástica a su precio, altamente elástica a la variable ingreso de los hogares, altamente sensible a la tasa de desempleo y también presenta elasticidad con respecto a la tasa de interés hipotecaria.

Título	Autor	Publicación	Metodología	Resultados
Determinantes de la Actividad Constructora en Colombia	Cárdenas, Mauricio, Ximena Cadena, y Juan Felipe Quintero.	Estudio realizado por Fedesarrollo para la Constructora Colpatría. 2004.	Variable dependiente para la demanda: licencias de construcción (m ²). Variables independientes demanda: desembolsos de crédito, tasa hipotecaria, tasa de desempleo, remesas y los flujos de capital al exterior. Variables independientes oferta: costos de producción, desembolsos a constructores, las licencias aprobadas y las expectativas de los agentes acerca de la construcción en el país.	La actividad constructora en Colombia, por el lado de la oferta está determinada principalmente por los costos asociados con la actividad, y por el lado de la demanda por el financiamiento y los ingresos de los hogares.
El sector financiero y la vivienda	Cárdenas, Mauricio y Mónica Hernández.	Estudio realizado por Fedesarrollo para Asobancaria, Bogotá. 2006.	Variable dependiente: licencias de construcción (m ²). Variables independientes: el precio de la vivienda, crédito de vivienda, tasa hipotecaria real, ingreso real de los hogares, tasa de desempleo y las transferencias o remesas del exterior.	Encontraron que: el crédito de vivienda tiene un impacto positivo y significativo sobre la actividad constructora. También encontraron que la tasa real hipotecaria tiene un efecto negativo sobre la actividad constructora, y que el crecimiento de los ingresos de los hogares tiene un efecto positivo, mientras que el desempleo tiene un efecto negativo, y que estos efectos son significativos.
El sector de la construcción en Colombia: hechos estilizados y principales determinantes del nivel de actividad	Departamento de Estudios Económicos, CAMACOL.	Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL), Departamento de Estudios Económicos. 2008.	Variable independiente: licencias de construcción aprobadas. Variables independientes: desembolsos totales al sector, índice de costos de construcción de vivienda, tasa real hipotecaria, desempleo, cambio en los ingresos de capital, cambio en los ingresos per cápita del hogar. Modelo VAR, variables: licencias, desembolsos totales y tasa de interés hipotecaria. Modelo ARIMA.	La tasa de interés hipotecaria es un determinante estadísticamente significativo de las licencias de construcción. Existe una correlación estadística fuerte entre los desembolsos y las licencias de construcción. Los ingresos de capital y de los hogares no son significativos en la estimación, o tienen signos contrarios a los esperados.

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Tabla 7, los estudios sobre los determinantes econométricos del desempeño del sector de la construcción en Colombia, cubren distintos períodos de tiempo y usan distintas técnicas econométricas. Sin embargo, estos estudios concuerdan en que la actividad de la construcción medida como m^2 o como licencias de construcción, se puede explicar usando variables como: los desembolsos hipotecarios individuales y a constructores, la tasa de interés real hipotecaria, el desempeño del PIB total y el desempleo. Estas variables tienen la capacidad de capturar gran parte de la variación de las licencias de construcción. Es importante señalar que en todos los estudios referenciados en la Tabla 7, se usa el mismo conjunto de variables como determinantes de la actividad constructora.

Ahora bien, los resultados obtenidos por Clavijo et al. (2004), sugieren que el crédito de vivienda tiene un impacto positivo y significativo sobre la actividad constructora; encontrando, por ejemplo, que con un nivel de significancia del 1%, hay un aumento del crédito de vivienda (desembolsos) del 1%, lo que aumenta la construcción de vivienda en un 0.19%, lo cual indica que la elasticidad de la actividad edificadora al crédito de vivienda es baja; es decir, si se incrementan los ingresos de los hogares en un 1%, se aumenta la construcción de vivienda en un 0.9%, mientras que si se incrementa en un 1% el desempleo, la actividad constructora disminuye un 3%, lo cual refleja el hecho de que el efecto del desempleo es muy relevante para el desempeño de la actividad constructora en Colombia.

En el estudio realizado por CAMACOL (2008), para el periodo de 1985 I -2007 IV, se hace una revisión de los estudios realizados hasta esa fecha; allí se encuentra que en los estudios anteriores se habían estimado, ya sean solo ecuaciones de oferta, de demanda o de oferta y demanda por separado; usando técnicas estadísticas como la regresión lineal múltiple. A partir de los hallazgos encontrados en los estudios anteriores, los autores estiman en un solo modelo de regresión lineal múltiple los determinantes tanto de la demanda como de la oferta de viviendas, encontrando que la tasa de interés hipotecaria es un determinante estadísticamente significativo de las licencias de construcción; ya que si se presenta un aumento del 1% en la tasa de interés hipotecaria, produciría una caída de 1,3% en las licencias de construcción.

Adicionalmente, en el estudio realizado por (CAMACOL, 2008), los autores identifican la presencia de una correlación estadística fuerte entre los desembolsos y las licencias de construcción, de modo que si se presentara un incremento de 1% en los desembolsos totales, esto se traduciría en un aumento de 0,2% en las licencias de construcción de vivienda. Igualmente, que un aumento del 1% en el desempleo, se traduciría en una caída en las licencias de construcción del 3,8%. A diferencia de las conclusiones obtenidas a partir de las estimaciones por Cárdenas y Hernández (2006), los resultados obtenidos en este estudio, indican que los ingresos de capital y de los hogares no son significativos en la estimación, o tienen signos contrarios a los esperados. Además del análisis de regresión, los autores introducen estimaciones con modelos de series de tiempo univariados y multivariados, como una forma de mejorar las predicciones obtenidas mediante el modelo de regresión lineal.

En ese sentido, los estudios analizados en este capítulo se ocupan de la oferta y la demanda de viviendas, usando como medida de las viviendas construidas las licencias aprobadas en m^2 . Conocer el comportamiento de la oferta y demanda de vivienda es importante a la hora de hablar de demanda de materiales de construcción, puesto que

finalmente la demanda de materiales de construcción es influenciada por la demanda de viviendas. A mayor demanda de viviendas, mayor demanda de concreto. La relación entre viviendas y algunos materiales de construcción es indirecta, puesto que la demanda de vivienda produce demanda de cemento y concreto. La relación entre demanda de vivienda y otros materiales como grabas y calizas no es directa.

3.2 Análisis de flujos de materiales bajo el enfoque de metabolismo urbano y social

Esta sección, profundiza en los materiales de construcción, mostrando los estudios encontrados en Colombia sobre flujos de materiales de construcción, usando el enfoque de metabolismo urbano.

Para iniciar, el concepto de metabolismo utilizado en el estudio de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza, describe y cuantifica los flujos de materiales y energía que se intercambian entre las sociedades y el medio natural. Este concepto se conoce como “metabolismo social”, cuando se aplica al análisis de los flujos de materiales y energía de los sistemas sociales, en cualquier escala de análisis, “metabolismo socio-económico”, cuando se aplica al análisis de los flujos monetarios y de materiales a nivel nacional, “metabolismo industrial”, cuando se aplica al análisis de los flujos de materiales y energía a nivel de un sector industrial o de una empresa en particular, y aplicado al estudio de los intercambios de materiales y energía entre los centros urbanos y su entorno natural, recibe el nombre de “metabolismo urbano”.

Por lo cual, la metodología de Análisis de Flujos de Materiales (AFM o MFA, por sus siglas del inglés), se enmarca dentro de este enfoque metodológico, y es usada para determinar los flujos de materiales a través de una economía, de una industria, de una ciudad, de un país, en general, o de una región.

En Colombia, además de los estudios econométricos presentados en la sección anterior, se han realizado estudios de metabolismo urbano, con el objetivo de contabilizar los flujos de materiales y/o desechos para algunas ciudades, y de metabolismo social, con el objetivo de contabilizar los flujos de materiales a través de la economía Colombiana.

Por ejemplo, Alfonso & Pardo (2014) aplican el enfoque de metabolismo urbano para contabilizar los flujos de materiales y energía a través de la ciudad de Bogotá (Colombia), analizando las entradas, acumulaciones dentro de la ciudad y salidas como desechos y/o residuos, con el objetivo de determinar las relaciones entre la demanda de materiales y energía y el impacto ambiental que esta genera. West & Schandl (2013), construyeron una base de datos con información de los flujos de materiales de 22 países de Latinoamérica y el caribe, incluyendo a Colombia, para el período 1970-2008. Ott (2006), realiza un análisis de flujos de materiales para los materiales secundarios de construcción (desechos), específicamente concreto y ladrillo, usando un modelo dinámico en Excel, para Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Vallejo, Pérez, & Martínez-Alier (2011), aplicando el enfoque de metabolismo social, construyen una base de datos con las cuentas de los flujos de materiales en la economía colombiana para el período 1970-2007, empleando indicadores de flujo de materiales directos para analizar la dimensión ecológica de la actividad económica Colombiana.

Para ilustrar lo anterior, la tabla 8, muestra un resumen más detallado de los estudios antes mencionados, identificando la metodología empleada, mostrando una breve descripción y resultados. Estos estudios tienen la particularidad de que algunos, usando fuentes de información oficiales, realizan cuentas de los flujos de materiales a nivel general, y otros realizan estas cuentas a nivel regional.

Tabla 8. Resumen, descripción de estudios sobre Flujos de Materiales y Metabolismo Urbano, realizados en Colombia a 2014.

Titulo	Autor	Publicación	Metodología	Descripción	Resultados
Urban material flow analysis: An approach for Bogotá, Colombia.	William H. Alfonso Piña, Clara Inés Pardo Martínez	Ecological Indicators, Volume 42, July 2014, Pages 32-42.	Metabolismo Urbano, Análisis de Flujos de Materiales y Energía.	En este estudio se buscaba determinar los flujos de materiales y energía de Bogotá (Colombia), utilizando los datos disponibles para los años 1980 y 2010 y analizar las tendencias en el tiempo. Determinar la relación entre la demanda de recursos y el impacto ambiental de estos, evaluar y comparar las tendencias en los flujos de materiales y energía de esta ciudad.	Las entradas y salidas de materiales y energía del sistema (Ciudad de Bogotá), están directa y linealmente relacionados. El consumo de energía y materiales de construcción ha aumentado en el período considerado. Los niveles de reciclaje en general y tratamiento de aguas residuales son bajos.
Material use and material efficiency in Latin America and the Caribbean.	James West, Heinz Schandl	Ecological Economics, Volume 94, October 2013, Pages 19-27.	Análisis de Cuentas de Flujos de Materiales.	Construyeron una base de datos con información de los flujos de materiales de 22 países de la región, para el período 1970-2008, usando la metodología descrita en Eurostat (2011). Calculando los flujos de biomasa para estos países, principalmente a partir de datos recopilados por la FAO, para cada uno de estos.	Una base de datos con información de los flujos de materiales de 22 países de Latinoamérica y el Caribe, para el período 1970-2008.
Oferta y Demanda de Recursos Minerales Secundarios en Medellín, Colombia. Un modelo dinámico.	Daniel Ott	Tesis de grado en Ingeniería Ambiental, Instituto de Ingeniería Ambiental (IFU) de ETH Zürich, Suiza. 2006.	Análisis de Flujos de Materiales y Balance de Materiales.	Construye un modelo dinámico, en Excel, para evaluar los flujos de materiales de construcción (concreto y ladrillo), demolidos en Medellín y demás municipios del AMVA.	Modelo dinámico en Excel para el análisis de flujos de materiales secundarios de construcción (concreto y ladrillo) en Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Titulo	Autor	Publicación	Metodología	Descripción	Resultados
Metabolic Profile of the Colombian Economy from 1970 to 2007.	Vallejo, María Cristina. Pérez Rincón, Mario A. Martínez-Alier, Joan.	Journal of Industrial Ecology. 2011.	Metabolismo social, Análisis de Flujos de Materiales.	Aplican el concepto de metabolismo social a la economía colombiana, analizando los patrones de uso de materiales en la economía colombiana, identificando los principales factores de uso de los recursos naturales, el uso excesivo o el agotamiento de estos, empleando indicadores de flujo de materiales directos para analizar la dimensión ecológica de la actividad económica en el período 1970-2007.	Base de datos con las cuentas de los flujos de materiales en la economía colombiana para el período 1970-2007.

Fuente: Elaboración propia.

En otros países, también, se han realizado estudios de Análisis de Flujos de Materiales, bajo el enfoque del análisis del metabolismo urbano y social, en donde generalmente los flujos de materiales son proyectados, usando distintas técnicas de simulación, para conocer la dinámica de estos en el tiempo, dando origen a una nueva metodología conocida como Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales.

En este punto, Billy (2012), por ejemplo, con el objetivo de hacer una proyección futura de los posibles volúmenes disponibles de aluminio reciclado en el sector de la construcción, realiza un análisis de flujos de materiales para determinar los flujos de aluminio reciclado en el sector de la construcción de viviendas en Francia, y proyecta estos flujos en el tiempo, usando simulación de Monte-Carlo, obteniendo de esta forma, un modelo de Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales. Por su parte, Hu (2010), realiza un análisis de flujos dinámicos de materiales, usando el enfoque de metabolismo industrial, para evaluar, en un primer caso, los flujos futuros de residuos de construcción y demolición en Beijing (China), en un segundo caso la dinámica de los stocks de vivienda urbana y rural en China y finalmente la dinámica a largo plazo de la oferta y la demanda de hierro y acero utilizado en la construcción de edificios residenciales en China.

Por otra parte, Müller (2006), presenta un modelo de Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales genérico y lo aplica al estudio de la dinámica de los inventarios de viviendas en Holanda, simulando el período comprendido entre los años 1900 y 2100. En la tabla 13, se presenta un resumen mucho más detallado de los estudios antes mencionados. Es importante señalar que tanto (Billy, 2012), como (Hu, 2010), usan la metodología introducida por (Müller D. , 2006) para el Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales, presentándose diferencias solo en la herramienta de simulación usada para proyectar los flujos de materiales en el tiempo.

Tabla 9. Resumen estudios realizados en otros países sobre MFA aplicado a la demanda de materiales a 2014.

Autor	Año	País	Publicación	Metodología Utilizada	Descripción
Billy, Romain	2012	Noruega y Francia (el estudio se realizó en Francia)	Norwegian University of Science and Technology. Repository. Master in Industrial Ecology. Student thesis.	Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales y simulación de Monte-Carlo en Excel.	Realiza una proyección futura de los posibles volúmenes disponibles de aluminio reciclado en el sector de la construcción, utilizando un modelo de Flujos Dinámicos de Materiales. Con el modelo MFA se describen los flujos de materiales actuales y a partir de estos se realiza una proyección de los flujos de materiales futuros y una estimación de las reservas de estos, teniendo en cuenta el ciclo de vida del aluminio en las edificaciones.
Hu, Mingming	2010	Holanda y China (el estudio se realizó en China)	Leiden University. Doctoral Thesis.	Análisis de flujos dinámicos de Materiales (desde el punto de vista del agotamiento de recursos). Evaluación del ciclo de vida de materiales. Enfoque de metabolismo industrial.	Analiza las estrategias de construcción y gestión de residuos de demolición en Beijing, la dinámica de los stocks de vivienda urbana y rural en China y la dinámica a largo plazo en la oferta y demanda de hierro y acero utilizado en la construcción de edificios residenciales en China. Identifica un fenómeno de oscilación en el nivel de producción de viviendas, que también se produce en el nivel de materiales, en cuanto a la demanda de hierro y acero residencial.
Muller, Daniel B.	2006	USA (Yale University) y Holanda	Ecological Economics - Journal	Análisis de flujos de materiales dinámicos.	Presenta un modelo de Análisis de Flujos de Materiales Dinámicos genérico y lo aplica al stock de viviendas en Holanda, simulando el período comprendido entre los años 1900 y 2100. La metodología desarrollada por el autor en este estudio, es aplicada por Billy Romain y por Mingming Hu, en sus investigaciones.

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, este apartado presentó los estudios que sirven como antecedentes para nuestra investigación, primero se evidenciaron los estudios realizados sobre los determinantes del comportamiento del sector de la construcción en Colombia, a nivel agregado, luego se abordó los estudios sobre análisis de flujos de materiales bajo el enfoque de metabolismo urbano y social realizado en Colombia. Y finalmente, se presentó algunas aplicaciones sobre análisis de flujos dinámicos de materiales encontradas en otros países. A partir de estos estudios se extraen los elementos

metodológicos que han de ser aplicados en nuestra investigación, y que se presentan en el capítulo siguiente.

4. Metodología

En este apartado metodológico, se hace una descripción general de la metodología aplicada en la investigación. En la Figura 5, muestra el esquema de la ruta metodológica adoptada por el investigador, la cual parte del enfoque metodológico del Metabolismo Social, descrito en la sección anterior. Del objeto de estudio, surge la necesidad de cuantificar los flujos de materiales y energía que se dan entre una sociedad y su ambiente, estos flujos se contabilizan usando la metodología de Análisis de Flujos de Materiales, y al combinar esta metodología con técnicas de simulación, que en nuestro caso de estudio es la Dinámica de Sistemas, surge el Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales, que es la metodología aplicada en la solución de nuestro problema objeto de estudio.

Figura 5: Resumen ruta metodológica de la investigación.



Fuente: elaboración propia.

4.1 Análisis de Flujos de Materiales

Como se ha mencionado, la aplicación de la metodología de metabolismo social, implica la contabilidad detallada de los flujos de materiales y energía, a través de un sistema social o económico. La herramienta analítica usada para calcular y visualizar los flujos de materiales y el balance de estos a través del entorno construido es llamada MFA (Análisis de Flujos de Materiales), por sus siglas del inglés Material Flows Analysis (Hu, 2010).

El análisis de flujos de materiales MFA, es un método analítico que permite cuantificar los flujos físicos de materiales dentro de un sistema determinado, a través de este y también los flujos de los materiales que salen del sistema. El MFA, resulta de gran utilidad a la hora de evaluar las consecuencias físicas de las actividades humanas sobre el ambiente (Hinterberger & otros, 2003).

El análisis de flujos, a nivel de sustancias es llamado SFA (por sus siglas del inglés, Substance Flow Analysis), mientras que cuando hablamos de MFA, nos referimos solo al estudio de los flujos de masa y volumen. El MFA y el SFA, pueden diferir en la aplicación, pero la metodología es similar. La estructura general para llevar a cabo el análisis de flujos de materiales, se compone de tres pasos; el primero, es la definición del sistema; el segundo, comprende la cuantificación de los flujos y stocks de materiales observados; el tercer y último paso comprende la interpretación de los resultados obtenidos.

El método de MFA/SFA, fue aplicado por primera vez al estudio del metabolismo o fisiología de las ciudades por Wolman (1965), seguido por Newcombe & otros (1978). Desde entonces ha sido aplicado, sobre todo en los países desarrollados para comprender la dinámica de las regiones densamente pobladas (Brunner & Baccini, 1992), para rastrear contaminantes a través de cuencas o regiones urbanas (Bergbäck et al. 1994; Van der Voet et al. 1994; Kleijn et al. 1994), en el desarrollo de los países para entender los impactos ambientales de las actividades humanas (Binder, 1996), entre otras aplicaciones (Hu, 2010).

Teniendo en cuenta, que a medida que se desarrolla la sociedad y crece la actividad económica, aumenta considerablemente la producción, uso y disposición de los materiales empleados en la producción de bienes y servicios, esto hace inevitable la presencia de impactos no deseados en el medio ambiente y en la sociedad que no se pueden descuidar. Analizar los flujos de materiales a través de los sistemas económicos, permite identificar la presencia de impactos no deseados del uso de estos materiales sobre el medio ambiente y su cuantificación, lo cual es de gran utilidad para una adecuada planeación de actividades de mitigación (Hinterberger & otros, 2003).

De modo que, el MFA, se basa en el principio de balance de materiales y abarca una gran variedad de enfoques analíticos y herramientas de medición de flujos, los cuales pueden ser utilizados en diferentes niveles de detalle. Esto permite ser usado a diferentes escalas espaciales y temporales, usando diferentes herramientas metodológicas, todo depende del tipo de análisis que se desee realizar y de su propósito (OECD, 2008).

Y, el AMF, puede ser usado, por ejemplo, para determinar los intercambios de materiales entre la economía y el medio ambiente a nivel nacional (analizar la situación de un país en particular), a nivel regional (un departamento o región) y a nivel local (una ciudad en específico). También se pueden analizar los flujos de materiales a través de un sector de la economía (como en nuestro caso de estudio), a través de una empresa en particular o de un sistema de producción dentro de una empresa (OECD, 2008).

El análisis de flujos de materiales presenta dos elementos principales. En primer lugar, están las cuentas sistemáticas de flujos de materiales en unidades físicas (MFAcc), que basadas en el principio de balance de masa, proporcionan una estructura para la información sobre los flujos de materiales. En nuestro caso de estudio en particular, estas cuentas representan las cantidades de cada material que entran y salen del sector de la construcción, las entradas se dan a partir de la construcción de nuevas edificaciones y a partir de la reparación a viviendas existentes. En segundo lugar, están los indicadores de flujos de materiales que se derivan de estas cuentas, que transmiten

información relevante de políticas sobre la importancia de los flujos de materiales y preocupaciones ambientales, para un público no experto. Estos indicadores son una medida cuantitativa de los flujos de materiales a través del sistema, y de las características y usos de estos materiales. En nuestro caso estos indicadores son, por ejemplo, los metros cuadrados de área por vivienda, personas por vivienda, cantidad de cada material por metro cuadrado de área construida, entre otros (OECD, 2008).

Tabla 10: Tipos de MFA y problemas de interés asociados.

Tema de interés	Preocupaciones específicas relacionadas con impactos ambientales, seguridad en el suministro y desarrollo tecnológico. Dentro de ciertos negocios, actividades económicas, países o regiones.			Preocupaciones ambientales y económicas generales relacionadas con el rendimiento de sustancias, materiales, bienes manufacturados		
	Asociados con:			a nivel de:		
Objeto de interés	Sustancias	Materiales	Productos (Bienes manufacturados)	Negocios	Actividades económicas	Países, regiones
		<i>Elementos o compuestos químicos</i>	<i>Materias primas, productos semielaborados</i>	<i>Baterías, automóviles, computadoras, textiles</i>	<i>Establecimientos, empresas</i>	<i>Minería, construcción, industria química, hierro y acero</i>
Tipo de análisis.	Análisis de Flujos de Sustancia (SFA)	Análisis de Sistemas Materiales (MSA)	Evaluación del Ciclo de Vida (LCA)	MFA a nivel de negocios	Análisis de entradas y salidas (IOA)	MFA en toda la economía (EW-MFA)
Tipo de herramienta de medición	<i>Cuentas de Flujos de Sustancias</i>	<i>Cuentas Individuales de Flujos de Materiales</i>	<i>Inventarios de Ciclo de Vida</i>	<i>Cuentas de Flujos de Materiales de Negocios</i>	<i>Tablas de entradas y salidas físicas</i>	<i>Cuentas de Flujos de Materiales en la economía</i>

Fuente: Elaboración propia a partir de (OECD, 2008).

En la Tabla 10, se resumen las principales aplicaciones de la metodología de Análisis de Flujos de Materiales en sus diferentes niveles. En las celdas amarillas se muestran los niveles en los cuales se enfoca nuestra investigación. Nuestra investigación, se enfoca en evaluar los flujos de materiales en el sector de la construcción y proyectar el comportamiento de estos flujos utilizando técnicas de simulación para el análisis de la seguridad en el suministro y los impactos ambientales de estos materiales.

El MSA, se basa en las cuentas de flujos de materiales específicos. Centrándose en materias primas seleccionadas o productos semi-terminados, en distintos niveles de detalle y aplicación (por ejemplo, cemento, papel, hierro y acero, cobre, plásticos, madera, agua); considerando las entradas y salidas a lo largo del ciclo de vida completo. Se aplica a materiales que plantean problemas particulares en cuanto a la sostenibilidad de su uso, seguridad del suministro en la economía, y consecuencias ambientales de su producción y usos (OECD, 2008).

La evaluación del ciclo de vida (LCA), se basa en los inventarios de ciclo de vida. Evaluando el ciclo de vida de los materiales desde la extracción de materiales de la litósfera, la producción de materias primas y usos, evalúa los efectos ambientales a lo largo del ciclo de vida de los productos. Se puede aplicar de igual forma a los servicios, porque es una metodología estandarizada en la norma ISO 14010 (OECD, 2008).

Ventajas del MFA:

Con el MFA es posible, por ejemplo, identificar las diferentes emisiones ambientales, asociadas a las diferentes etapas del flujo de un material en particular.

MFA es la única herramienta que puede:

- ✓ Proporcionar una visión integrada de los flujos de recursos a través de la economía;
- ✓ Capturar los flujos que no entran en la economía en las operaciones, pero que son relevantes desde el punto de vista ambiental;
- ✓ Revelar cómo los flujos de materiales se desplazan dentro de los países y entre los países y las regiones, y cómo esto afecta a la economía y el medio ambiente dentro y fuera de las fronteras nacionales.

Desventajas del MFA:

- ✓ Requiere de una gran cantidad de datos para ser implementada, y en la actualidad hay pocos datos fiables y disponibles para los países en desarrollo.
- ✓ Hay una necesidad de hacer frente a las incertidumbres.

4.2 Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales

El Análisis de Flujos de Materiales, es una herramienta que permite identificar y analizar los flujos de materiales y la acumulación de estos dentro de límites espaciales y temporales predefinidos. Para su aplicación se utilizan datos de las entradas, salidas y existencias de materiales para un sistema dado. Mientras que el Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales, se utiliza para cuantificar los flujos de materiales pasados, y a partir de estos establecer patrones de flujos de materiales; aplicar los tiempos de vida de productos que contengan este tipo de materiales para realizar seguimiento a los cambios temporales en los flujos de estos, con el fin de modelar distintos escenarios que permitan predecir el consumo de estos materiales y la generación de residuos producto de su proceso de fabricación, uso, reciclaje y/o disposición final (Park, 2010).

Aunque la metodología de MFA, ha sido estudiada desde hace algunos años, la metodología de Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales es relativamente nueva en la comunidad académica, su introducción como metodología se remonta al año 2006 con Daniel Müller (Müller, 2006); quien realiza una descripción general de la metodología y la aplica al caso particular de los flujos del concreto en las viviendas en Holanda, teniendo en cuenta los tiempos de vida de las edificaciones, y el uso del concreto dentro de estas. A continuación, se hará una descripción más detallada del método propuesto por Müller (2006), en su estudio.

El modelo describe la acumulación de materiales y productos a través de un sistema, analizando las entradas, salidas y los determinantes; es diseñado como una guía para modelos de análisis de flujos dinámicos de materiales en diferentes sistemas a distintos niveles.

4.3 Dinámica de Sistemas

Aunque se pueden aplicar varias técnicas y métodos de simulación diferentes en el campo del análisis de los flujos dinámicos de materiales, en nuestro caso de estudio se aplicará simulación continua, y específicamente, como técnica de modelado, la dinámica de sistemas. Debido a que es una técnica de modelado ampliamente conocida en el campo de la simulación continua, y se adecúa con facilidad al problema objeto de estudio en nuestra investigación.

La dinámica de sistemas (DS), es un método de simulación cuyos elementos básicos son la realimentación, los retardos y las no linealidades (Sterman, 2000). Se utiliza para modelar problemas dinámicos que surgen en sistemas sociales, administrativos, económicos o ecológicos complejos, los cuales presentan condiciones que cambian a través del tiempo. Además, permite caracterizar la dinámica del comportamiento de los sistemas por medio de modelos matemáticos en forma de ecuaciones diferenciales, analizar los ciclos de retroalimentación en términos de flujos de materiales y depósitos de estos.

En DS, se emplean diferentes clases de diagramas, como los Diagramas de Causalidad, que se usan para representar relaciones causa y efecto, entre variables. De igual forma también se utilizan los Diagramas de Flujos y Niveles o diagramas de Forrester, que permiten representar el modelo matemático de ecuaciones diferenciales como un dibujo. Se recomienda realizar primero el diagrama de causalidad, y de este, partir para la elaboración del de flujos y niveles (Sterman, 2000).

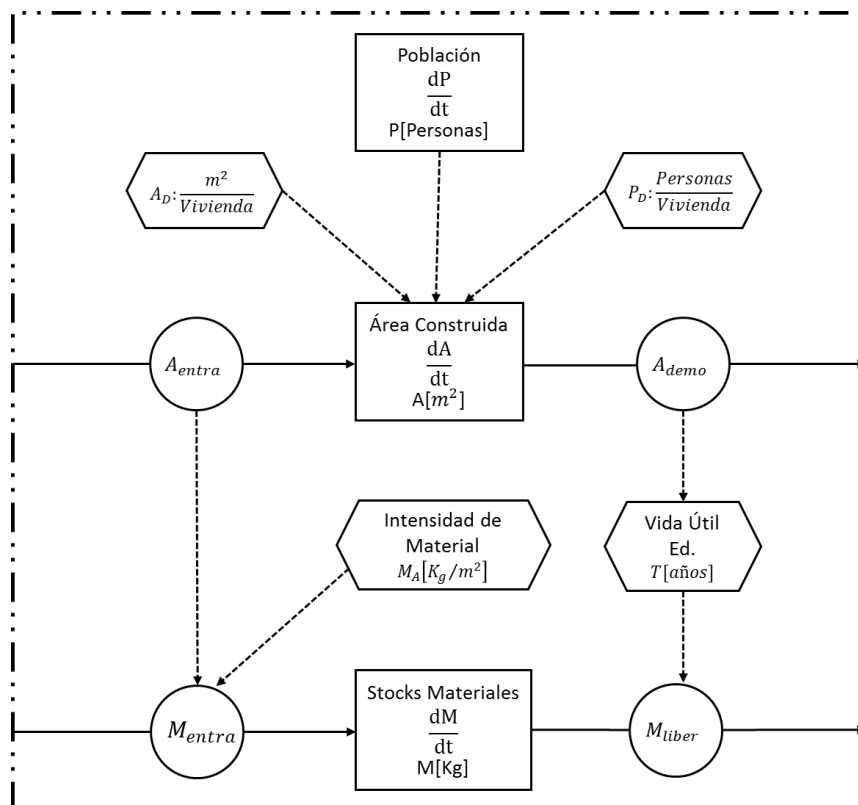
En síntesis, este capítulo presentó una descripción de las herramientas metodológicas usadas en el desarrollo de esta investigación. La aplicación y desarrollo de estas herramientas, se presenta en el apartado siguiente.

5. Modelo de Flujos de Materiales de Construcción en Colombia

En este capítulo, se presenta el modelo desarrollado para el Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales de Construcción en Colombia. El modelo permite analizar la dinámica del flujo de materiales de construcción en Colombia; en el mediano y largo plazo, identificando patrones de consumo y desechos generados.

El modelo planteado parte del modelo desarrollado por Müller (Müller D. , 2006) para el Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales. El modelo de Flujos Dinámicos de Materiales, describe la acumulación de materiales a través de un sistema, analizando las entradas, salidas y los determinantes de la acumulación. Este modelo es el punto de partida para la simulación presentada en la Figura 6.

Figura 6: Esquema conceptual de MFA para el modelo de stocks dinámicos de materiales de construcción.



Fuente: Elaboración propia a partir de esquema conceptual de Müller (2006).

En este caso particular, el objetivo es evaluar los Flujos de Materiales de construcción en Colombia, el cual está compuesto por tres tipos de procesos, que se muestran en la Figura 6. Estos procesos se expresan como rectángulos: población (P), que en este caso representa la población colombiana, área construida (A), la cual se mide en m^2 ; y por último, el stock de materiales (M), el cual se mide en Kg. Cada proceso tiene una variable de estado asociada, y una derivada, que representa el stock acumulado.

Cada proceso tiene un flujo de entrada y un flujo de salida, A_{entra} representan las entradas de vivienda al sistema, que en nuestro caso se miden con las licencias de construcción aprobadas, en m^2 , A_{demo} representan las viviendas que salen del sistema producto de las demoliciones, en m^2 , M_{entra} representa las entradas de materiales al sistema y se mide en kilogramos (Kg), estas entradas están determinadas por las entradas de viviendas al sistema y por la densidad o intensidad de materiales (requerimiento de materiales por metro cuadrado), M_{liber} representa los materiales que salen del sistema producto de las demoliciones, y se miden en kilogramos (Kg). Estos flujos de entrada y de salida están representados por líneas rectas, flechas y círculos. Los flujos y los niveles están asociados a unos determinantes, los cuales se representan con hexágonos, estos son; A_D que representa los metros cuadrados en promedio que tiene una vivienda en Colombia, P_D representa el promedio de personas que habitan por vivienda en Colombia, y finalmente, T representa la vida útil de las viviendas. Las influencias entre las diferentes variables son indicadas con flechas de líneas punteadas.

El área construida es impulsada por la población, los metros cuadrados por vivienda y las personas por vivienda. La demanda de vivienda, junto con el tiempo de vida útil, determina la cantidad de viviendas que se requiere añadir y/o retirar del sistema (demoler). Las entradas de viviendas al sistema, dependiendo de los sistemas constructivos usados, determinan la cantidad y los materiales requeridos. Estas entradas de materiales, junto con la vida útil de las viviendas, determinan el inventario y las salidas de cada material del sistema.

A continuación, se presentan las ecuaciones generales consideradas en nuestro Análisis de Flujos Dinámicos de Materiales, en donde, las primeras dos ecuaciones son ecuaciones de balance, mientras que las cuatro siguientes determinan el enfoque del modelo.

Ecuaciones de balance para el área construida:

Ecuaciones de balance para los materiales:

Las ecuaciones de balance, anteriores, implican asumir la conservación de masa y unidades de servicio (viviendas), mientras que la conservación de materiales es algo sencilla, la conservación de las unidades de servicio requiere mayor explicación. Desde una perspectiva económica, el valor de un producto se deprecia con el tiempo, un atributo que podría no ser considerado en una ecuación de balance. En la ecuación (1), sin embargo, se asume que el servicio derivado de un producto (en este caso una vivienda), es constante a lo largo de su vida útil. Esta suposición es adecuada para la mayoría de los bienes duraderos; sin embargo, es importante tener en cuenta que esta definición de servicio no tiene en cuenta el concepto de valor del producto.

A_D y P_D , son definidas a partir de cifras estadísticas como la encuesta de calidad de vida del DANE y cuentas estadísticas de entidades como CAMACOL.

Las unidades de servicio (viviendas), pueden tener diferentes tiempos de vida útil, y estos a su vez, pueden estar representados por una distribución de tiempo de vida ($T_V(t, t')$), donde T_V es la vida útil promedio de las viviendas. Esta distribución se define como la probabilidad que una unidad (una vivienda), sea descartada o desechada en un tiempo t , dado que esta entró en uso en el tiempo t' . La distribución del tiempo de vida útil relaciona las entradas y salidas del sistema, lo cual se muestra en la ecuación 4.

La Ecuación (5), conecta los subsistemas de unidades de servicio (viviendas) y de materiales: Las entradas de material M_{entra} y de servicios A_{entra} , se relacionan a través del consumo de materiales por metro cuadrado M_A .

En la ecuación 6, se asume que los materiales, al igual que las viviendas en la ecuación 4, siguen un patrón de distribución de tiempo de vida útil, T_M en esta ecuación representa la vida útil promedio de los materiales.

Asumiendo que ningún material se sustituye durante la vida útil de las viviendas, podemos establecer que la vida útil promedio de las viviendas T_V es igual a la vida útil promedio de los materiales T_M , como se muestra en la ecuación 6a.

Note que en nuestro caso de estudio no se modela la población como variable de nivel, considerando nacimientos, defunciones, inmigraciones y emigraciones sino que, en su lugar, se usan proyecciones de fuentes oficiales como el como el DANE y el Banco Mundial.

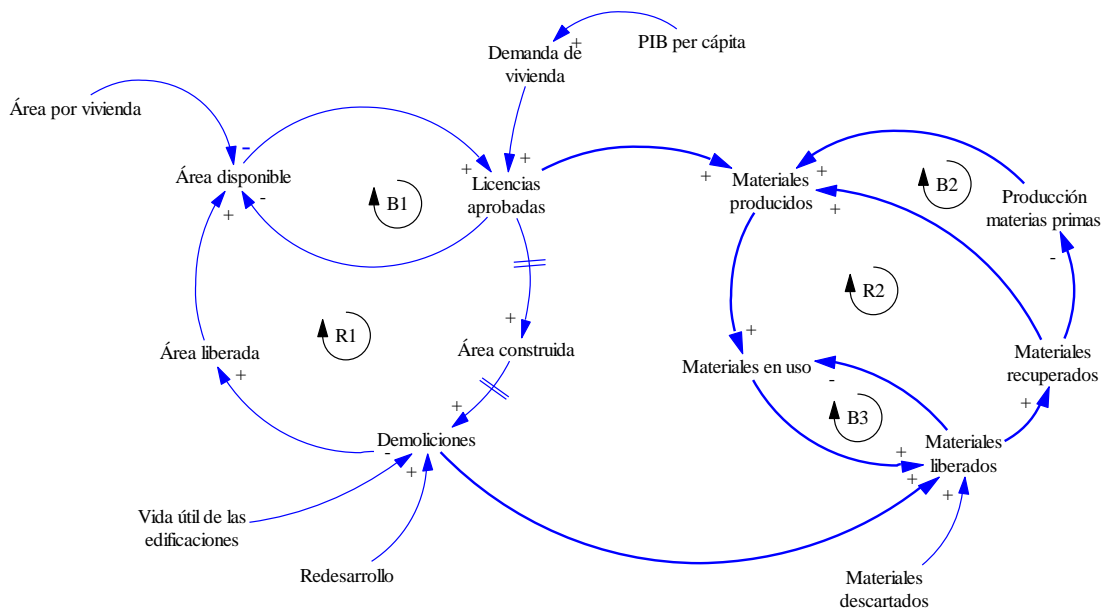
5.1 Modelo Dinámico de la Construcción de Viviendas en Colombia

En la sección anterior, vimos que el modelo de flujos dinámicos de materiales se basa en dos ecuaciones de balance de las variables de estado, área construida y materiales de construcción. Estas variables de estado se relacionan de forma dinámica pues el avance de la construcción demanda materiales que se extraen y acumulan, tal como se representa en la Figura 7.

La resume la dinámica del sector de la construcción de viviendas en Colombia y su relación con la acumulación de materiales mediante un diagrama causal. Un diagrama causal muestra las relaciones de causa y efecto que se dan entre las variables, permitiendo identificar las principales interacciones que crean la dinámica del modelo y los ciclos de retroalimentación importantes para el problema (Sterman, 2000).

A cada relación de causalidad se le asigna una polaridad, ya sea positiva (+) o negativa (-) para indicar como cambia la variable dependiente cuando cambia la variable independiente (Sterman, 2000).

Figura 7: Flujos dinámicos de materiales de construcción en áreas urbanas.



Fuente: elaboración propia, usando el software Vensim 6.3

De la Figura 7, tenemos que a mayor demanda de viviendas mayores solicitudes de licencias pedidas y aprobadas. A más licencias de construcción aprobadas, menor es el área disponible (ciclo de balance número 1 (B1)) y mayor área construida. La construcción dura unos 9 meses y eso se representa con el símbolo de retardo.

Cuando las edificaciones en un área construida alcanzan su vida útil, aumenta el área susceptible de demolición. Un área construida puede demolerse antes de que las edificaciones alcancen su vida útil si hay una decisión de redensificación. Con la demolición se libera área que se convierte en área disponible para la construcción de nuevas edificaciones. Esta relación de realimentación constituye de refuerzo número 1 (R1).

Las licencias aprobadas generan una demanda de materiales de construcción, que generalmente se satisface mediante la producción y/o extracción de materiales nuevos, una vez que estos materiales llegan a las obras, ingresan al sistema como materiales en uso, por lo tanto, a mayor cantidad de licencias aprobadas mayor producción de

materiales de construcción nuevos, a mayor cantidad de materiales producidos, mayor cantidad de materiales en uso (materiales acumulados en las edificaciones).

Cuando las edificaciones llegan al final de su vida útil, son demolidas liberando materiales, los cuales tienen dos destinos: una parte de estos son recuperados y reutilizados (materiales recuperados), mientras que otra parte son descartados y se convierten en residuos de la construcción y demolición (RCD). Los materiales descartados representan los materiales liberados productos de las demoliciones, que se desechan como residuos de la construcción y demolición (RCD). Por lo tanto, a mayor cantidad de materiales en uso, y para una tasa de reciclaje dada, mayor cantidad de materiales recuperados y mayor cantidad de materiales liberados.

Los materiales producidos, materiales en uso, materiales liberados, materiales recuperados, y la producción de materias primas, forman el ciclo de balance número 2 (B2). En este ciclo de balance tenemos que: a mayor producción de materias primas, mayor cantidad de materiales producidos, a mayor cantidad de materiales producidos, mayor será la cantidad de materiales en uso, a mayor cantidad de materiales en uso, mayor cantidad de materiales liberados producto de las demoliciones, a mayor cantidad de materiales liberados producto de la demoliciones, mayor cantidad de materiales recuperados, y finalmente, a mayor cantidad de materiales recuperados, menor producción de materias primas.

Los materiales recuperados, materiales producidos, materiales en uso y materiales liberados, dan origen al ciclo de refuerzo número 2 (R2). En este ciclo de refuerzo tenemos que: a mayor cantidad de materiales producidos, mayor cantidad de materiales en uso, a mayor cantidad de materiales en uso, mayor cantidad de materiales liberados producto de las demoliciones, a mayor cantidad de materiales liberados producto de las demoliciones, mayor será la cantidad de materiales recuperados; finalmente, a mayor cantidad de materiales recuperados, mayor será la cantidad de materiales producidos.

Por último tenemos que, los materiales liberados y los materiales en uso, forman el ciclo de balance número 3 (B3). De este ciclo de balance tenemos que: a mayor cantidad de materiales en uso, mayor será la cantidad de materiales liberados producto de las demoliciones, y a mayor cantidad de materiales liberados, menor será la cantidad de materiales en uso.

5.2 Formulación del modelo

El modelo dinámico descrito, en las dos secciones anteriores, se formula en el software Powersim Studio 9. Las variables de estado, y principales parámetros se resumen en la siguiente tabla y las ecuaciones del modelo se presentan en el ANEXO B.

Tabla 11: Resumen modelo en formulación del modelo en Powersim.

Variables de estado	Descripción	Dimensión	Unidades
Área andenes	Los andenes y vías constituyen el 25% del área total construida. Los andenes representan el 25% del área destinada para andenes y vías.		metro ²

Variables de estado	Descripción	Dimensión	Unidades
Inventario Materiales	Materiales de construcción acumulados en las edificaciones	1x12	Kilogramo
Materiales demolición	Materiales liberados producto de las demoliciones	1x12	Kilogramo
Materiales viviendas antiguas	Materiales acumulados en las viviendas que ya alcanzaron su vida útil y que pueden ser objeto de demoliciones	1x12	Kilogramo
Materiales vías	Materiales acumulados en las vías urbanas	1x4	Kilogramo
Residuos	Residuos producto de la demolición de viviendas	1x12	Kilogramo
Área construida	A 2013, según cálculos propios, teniendo en cuenta las cifras del DANE, teníamos un total de 1.448.721.825,30544 m ² construidos de vivienda en Colombia.		metro ²
Área demolida	Área ocupada por las viviendas demolidas		metro ²
Área disponible	Según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, en Colombia, a 2013, había 54.665 hectáreas de suelo desarrollable para vivienda, delimitado como suelo de expansión y urbano (suelo de desarrollo y renovación urbana).		metro ²
Área en construcción	Representa el área de las edificaciones que están en proceso de construcción, pero que no han sido terminadas aun. Fuente: Censo edificaciones DANE a diciembre de 2013.		metro ²
Área viviendas antiguas	Área de viviendas que ya cumplieron su vida útil y que pueden ser objeto a demoliciones		metro ²
Área vías	Los andenes y vías constituyen el 25% del área total construida. Las vías representan el 75% del área destinada para andenes y vías.		metro ²

Principales parámetros	Descripción	Dimensión	Unidades
Hogares_por_vivienda	Información disponible en la encuesta de calidad de vida del DANE, la cual es publicada con periodicidad anual. Según la última encuesta nacional de calidad de vida correspondiente al año 2013, la cual fue publicada en marzo de 2014, en promedio hay 1,04 hogares por vivienda en Colombia.		hogar/vivienda
Intensidad_MC	Intensidad en el uso de materiales de construcción para el sistema constructivo mampostería confinada. Se lee como la cantidad de cada material, en kilogramos, que se requiere para construir un metros ² de edificación bajo el sistema constructivo mampostería confinada. Información tomada de: Salazar, A. (2013).	1x12	Kilogramo/metro ²
Intensidad_ME	Intensidad en el uso de materiales de construcción para el sistema constructivo mampostería estructural. Se lee como la cantidad de cada material, en kilogramos, que se requiere para construir un metros ² de edificación bajo el sistema constructivo mampostería estructural. Información tomada de: Salazar, A. (2013).	1x12	Kilogramo/metro ²
Intensidad_SI	Intensidad en el uso de materiales de construcción para el sistema constructivo industrializado. Se lee como la cantidad de cada material, en kilogramos, que se requiere para construir un metros ² de edificación bajo el sistema industrializado. Información tomada de: Salazar, A. (2013).	1x12	Kilogramo/metro ²
Participación_MC	Participación en porcentaje del sistema constructivo Mampostería Confinada en el total de las licencias de construcción aprobadas. Se lee de la siguiente forma; del total de las licencias aprobadas, el 35,7% corresponde a licencias para viviendas construidas con el sistema constructivo Mampostería Confinada. Datos calculados a partir de las estadísticas de licencias de construcción publicadas por el DANE.		%

Principales parámetros	Descripción	Dimensión	Unidades
Participación_ME	Participación en porcentaje del sistema constructivo Mampostería Estructural en el total de las licencias de construcción aprobadas. Se lee de la siguiente forma; del total de las licencias aprobadas, el 39,3% corresponde a licencias para viviendas construidas con el sistema constructivo Mampostería Estructural. Datos calculados a partir de las estadísticas de licencias de construcción publicadas por el DANE.		%
Participación_SI	Participación en porcentaje del sistema industrializado en el total de las licencias de construcción aprobadas. Se lee de la siguiente forma: del total de las licencias aprobadas, el 25% corresponde a licencias para viviendas construidas con el sistema industrializado. Datos calculados a partir de las estadísticas de licencias de construcción publicadas por el DANE.		%
Personas_por_hogar	Información disponible en la encuesta de calidad de vida del DANE, la cual es publicada con periodicidad anual. Según la última encuesta nacional de calidad de vida correspondiente al año 2013, la cual fue publicada en marzo de 2014, en promedio existen 3,5 personas por hogar.		Persona/hogar
Licencias_aprobadas	Se toma como referencia el área total aprobada para vivienda en Colombia para el año 2013, 77 municipios. En m ² . Información disponible en el DANE. www.dane.gov.co		metro ² /yr
Personas_por_vivienda	Es una medida el grado de hacinamiento que se da en las viviendas en Colombia. Representa el número de personas que habían una vivienda promedio en Colombia. Y se calcula como la multiplicación del número de hogares que habitan una vivienda en promedio, por la cantidad de personas que en promedio conforman un hogar.		Persona/vivienda
PIB_per_cápita	PIB per cápita para Colombia en pesos de 2005. Proyecciones tomadas del FMI hasta 2019, en adelante se asume la tasa de crecimiento de 2019 con respecto a 2018 de las mismas proyecciones. Serie tomada: Imf_1980-		Pesos

Principales parámetros	Descripción	Dimensión	Unidades
	2018.nominal gdp, busd.xlsx.		
Población	Proyecciones de la población disponibles en el DANE, datos disponibles desde 1985 hasta 2020. Para los años siguientes a 2020, se toma como porcentaje de incremento de la población anual, el % de incremento del año 2020 con respecto a 2019.		Persona
Tiempo_demolición	Se asume que el tiempo máximo que dura una vivienda es de 101 años. Por lo tanto, ninguna vivienda puede superar los 101 años de vida.		yr
Vida útil promedio de edificaciones	González (2005), encontró que la vida útil de los edificios está entre 47 y 75 años. Tomando como referencia información sobre Venezuela y Costa Rica, países que presentan alto grado de similitud con Colombia en cuanto a sistemas constructivos y materiales usados.		yr
Área_por_vivienda	Según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, en Colombia se presenta una densidad de 100 viviendas por hectáreas, una hectárea corresponde a 10.000 m ² si se divide 10.000/100 tenemos que en promedio una vivienda tiene un área de 100 m ² .		metro ² /vivienda
Principales tasas	Descripción	Dimensión	Unidades
Tasa_otros_usos	Según cifras del plan parcial de Naranjal en Medellín, el 62% del área total disponible será destinado para construir viviendas, por lo tanto para otros usos será destinado el 38%.		yr ⁻¹
Tasa_reciclaje_RCD	En Colombia, según los resultados obtenidos por Castaño et. Al, (2013) en su investigación, entre el 5 % y el 10 % de los residuos de construcción y demolición son sometidos a procesos de reciclaje y reutilización.		%

Principales parámetros	Descripción	Dimensión	Unidades
Tasa_redensificación	Según cifras del plan parcial de Naranjal en Medellín, el 62% del área total disponible será destinado para construir viviendas. Dado que hasta el momento no se ha encontrado una cifra distinta de los proyectos de redensificación que se han implementado en las ciudades Colombianas, en nuestro estudio tomaremos esta cifra como referencia.		%
Porcentaje_and	El 25% del área aprobada para construcción de edificaciones se debe destinar a andenes y vías. De ese porcentaje, tomando como referencia información disponible sobre el macroproyecto ciudad verde (ubicado en Soacha), el 5% del área total del proyecto corresponde a andenes.		%
Porcentaje_vías	El 25% del área aprobada para construcción de edificaciones se debe destinar a andenes y vías. De ese porcentaje, tomando como referencia información disponible sobre el macroproyecto ciudad verde (ubicado en Soacha), el 5% del área total del proyecto corresponde a andenes, y el 20% restante a vías.		%

Fuentes de datos: ver ANEXO B

5.3 Validación y calibración del modelo

En esta sección, se presentan los resultados de la validación y calibración del modelo de dinámica de sistema desarrollado. La validación permite evaluar la estructura del modelo y su capacidad para reproducir el comportamiento real del sistema; mientras que la calibración, por su parte, permite estimar algunos elementos (parámetros) del modelo, los cuales no pueden obtenerse a partir de observaciones directas.

5.3.1 Validación del modelo

La validación de un modelo de dinámica de sistemas (DS), consiste en establecer confianza en la estructura del modelo y evaluar la precisión del modelo para reproducir el comportamiento real del sistema, lo cual tiene sentido, en la medida en que se tenga la suficiente confianza en la estructura del modelo (Barlas, 1996). El proceso de validación de un modelo en DS comienza con la validación de su estructura, una vez se establece que la estructura es la adecuada, se procede a evaluar la precisión del comportamiento del sistema.

Pruebas directas a la estructura

Con estas pruebas se evalúa la validez de la estructura del modelo, usando el conocimiento del sistema real para comparar la estructura del modelo con la estructura real del sistema. En este proceso, se toma cada relación, expresada mediante una relación lógica o ecuación matemática, de forma individual, y se compara teniendo en cuenta el conocimiento disponible sobre el sistema real (Barlas, 1996). Existen dos tipos de pruebas directas a la estructura, que son: las pruebas de consistencia dimensional y las pruebas de confirmación de parámetros.

I. Consistencia dimensional

En la construcción del modelo, se verificó que cada una de las ecuaciones y relaciones lógicas se construyeran de tal forma que se garantizara la consistencia dimensional. Para garantizar esto, cada una de las ecuaciones y relaciones lógicas del modelo fueron revisadas de forma detallada. Una vez garantizado que las ecuaciones y relaciones lógicas eran correctas, se pasó al siguiente paso en la construcción del modelo, vincular estas ecuaciones y relaciones al software PowerSim Studio 9, el cual exige, que al momento de realizarse las simulaciones, exista consistencia dimensional.

II. Confirmación de parámetros y variables exógenas

Cada uno de los parámetros y de las variables exógenas del modelo, han sido obtenidas a partir de fuentes de información confiables, tales como: el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL), la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, entre otros. En el **ANEXO A**, se presentan en detalle las variables y parámetros usados en el modelo, y las fuentes de información de donde se obtuvieron.

Pruebas de estructura orientadas al comportamiento

Con este tipo de pruebas, se busca evaluar la validez de la estructura del modelo en DS de forma directa, aplicando una serie de pruebas, las cuales implican simulación, al comportamiento generado por el modelo (Barlas, 1996). Estas pruebas se pueden aplicar, ya sea al modelo o a sub-modelos aislados. Algunas de estas pruebas, son pruebas de límites del modelo, de condiciones extremas, errores de integración y análisis de sensibilidad.

I. Pruebas de límites del modelo

Con esta prueba se busca determinar cuáles son los límites que fueron considerados a la hora de definir las variables del sistema, comprobar si esos límites son apropiados para el problema objeto de estudio, establecer cuáles variables son exógenas y cuáles son endógenas, cuáles son influenciadas e influyen el sistema o cuáles son influenciadas o influyen el sistema (Barlas, 1996). En la sección 8.1, se muestra la dinámica de los flujos de

materiales de construcción de vivienda, a partir de la cual se establece de forma implícita las variables más importantes que se tratan de forma endógena y las que se tratan de forma exógena.

II. Pruebas de errores de integración

Permiten verificar si los resultados del modelo son sensibles al tiempo de paso y método de integración. En nuestro caso, el tiempo de paso seleccionado fue de un año, y el método de integración Runge-kutta de orden cuatro. En el **ANEXO A**, se muestran los resultados de las pruebas en detalle.

III. Análisis de sensibilidad

Permite determinar los parámetros a los cuales el modelo es muy sensible, evaluando si el sistema real presenta alta sensibilidad frente a los parámetros correspondientes (Barlas, 1996).

Los parámetros seleccionados para realizar el análisis de sensibilidad, fueron: vida útil de las edificaciones, área por vivienda y PIB per cápita. Estos parámetros fueron escogidos dada su gran relevancia dentro del modelo. Para el caso de la vida útil promedio de las edificaciones, se tomaron valores de 61, 40 y 20 años respectivamente, para el área por vivienda, se tomaron valores de 65, 85 y 105 metros cuadrados por vivienda, mientras que para el PIB per cápita, se tomaron tasas de crecimiento entre 0,5% y el 6%, variando los porcentajes en 0,5%.

De las pruebas de validación, que se muestran en el ANEXO A, tenemos que el modelo es sensible a la variación en la vida útil promedio de las edificaciones. Si la vida útil disminuye, se aceleran las demoliciones, por lo tanto aumenta el área disponible. Si la vida útil aumenta, disminuyen las demoliciones, por lo tanto, disminuye el área disponible.

El modelo también es sensible a variaciones en el área por vivienda. Si el área por vivienda aumenta, el área disponible se agota rápidamente, y como resultado se aceleran los procesos de expansión y demolición. Si el área disponible se agota, aumenta el déficit de vivienda, como resultado de que el área disponible se agota rápidamente (ANEXO A).

Y finalmente, tenemos que el modelo es sensible a variaciones en el comportamiento del PIB per cápita, si el PIB per cápita aumenta, aumenta la demanda de nuevas viviendas, representadas en las licencias de construcción solicitadas y aprobadas; por lo tanto, el área disponible disminuye. El consumo de materiales aumenta y de igual forma el área total construida.

5.3.2 Calibración del modelo

La calibración es una herramienta útil para la estimación de parámetros inciertos, así como con más precisión la definición de la incertidumbre del modelo. La calibración consiste en la comparación de los resultados del modelo con datos empíricos, que conduce a la identificación de los valores de los parámetros del modelo que logran un buen ajuste (Karnon & Vanni, 2011).

Los datos usados en este estudio corresponden a series de tiempo de variables que describen el comportamiento del sector de la construcción en Colombia, la población y tendencias sociales y de variables económicas como el PIB, el PIB per cápita y tasas de interés, obtenidas de; el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), CAMACOL (Cámara Colombiana de la Construcción), UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), el Banco de la República, el FMI (Fondo Monetario Internacional) y el Banco Mundial.

La mayoría de los valores de los parámetros del modelo desarrollado se derivan de la literatura. Otros parámetros no observables como el área por vivienda, la vida útil promedio de las edificaciones, tiempo de demolición y tasa de redensificación, se estiman por medio de la metodología de calibración propuesta por Karnon & Vanni (2011), según se muestra a continuación.

I. Parámetros a incluir en la calibración

El uso más común de la calibración es estimar los parámetros del modelo que no son observables, permitiendo que sólo éstos varíen en el proceso de calibración. Para nuestro caso particular, estos parámetros son; área por vivienda, vida útil promedio de las edificaciones, tiempo de demolición y tasa de redensificación.

II. Selección de los objetivos de calibración

Para los parámetros seleccionados, los límites se establecieron de la siguiente forma: para el área por vivienda se inició el proceso de calibración teniendo en cuenta información divulgada por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, asignándole un valor de 100 metros cuadrados, para la vida útil promedio de edificaciones se tomaron los valores determinados por González (2005), asignándole un valor de 61 años, para la tasa de redensificación el valor inicial fue calculado teniendo en cuenta información disponible sobre los planes parciales desarrollados en las principales ciudades de Colombia, con un valor inicial de 87%; finalmente, para el caso del tiempo de demolición, se tomó un valor inicial de 20 años. Para el área por vivienda, en la calibración se tomaron como límite superior 105 metros cuadrados, y como límite inferior, 55 metros cuadrados; para la vida útil de las edificaciones se tomará como límite superior 80 años y como límite inferior 40 años, para el tiempo de demolición se tomaron tiempos entre 10 y 20 años, y para la tasa de redensificación valores entre el 65 y el 96%.

III. Medidas de bondad de ajuste

En nuestro caso, para la calibración del modelo, se seleccionó como medida de bondad de ajuste, la prueba de mínimos cuadrados, dado que es un método intuitivo y no exige gran cantidad de datos para su aplicación (Karnon & Vanni, 2011).

El método de mínimos cuadrados se basa en el cálculo de la suma de los errores cuadrados, $Q(\theta)$, entre los datos empíricos y los datos simulados, para cada valor de los parámetros de entrada. Los valores que mejor se ajusten a los datos son aquellos que minimizan esta suma.

Donde θ es el parámetro de entrada o un vector de parámetros, $Q(\theta)$ representa la estimación de los datos observados, \hat{y}_i representa el resultado del modelo dado el parámetro de entrada θ .

Para cada variable i , la distancia específica entre los valores simulados e históricos se puede evaluar con el error cuadrático, es decir, la suma de las diferencias absolutas entre los valores históricos y_i y los valores simulados de cada variable \hat{y}_i al cuadrado.

IV. Estrategias de búsqueda de parámetros

Para encontrar los valores de los parámetros o conjuntos de valores que respondan a los objetivos de calibración especificados para nuestro modelo, se usó el método de algoritmos genéticos, el cual viene integrado en el software Powersim Studio 9. El lector interesado puede leer de algoritmos genéticos en: Darwin, 1859; Holland, 1975; Pose, 2000; y manual de Powersim Studio 9.

V. Criterios de convergencia o aceptación

El criterio de aceptación usado para calibrar el modelo desarrollado fue seleccionar el valor de los parámetros que permitan reducir el error cuadrático medio, tanto de las licencias aprobadas como del área finalizada.

VI. Regla de terminación

Estos criterios permiten determinar si el proceso de calibración (o la búsqueda de parámetros) se ha completado. En este caso, se usó como regla de terminación del proceso de calibración, la convergencia de los resultados del modelo con los objetivos de calibración simulados.

VII. Integración de los resultados de la calibración

Se usan las estimaciones derivadas del ajuste de los parámetros de entrada calibrados.

Resultados de la calibración

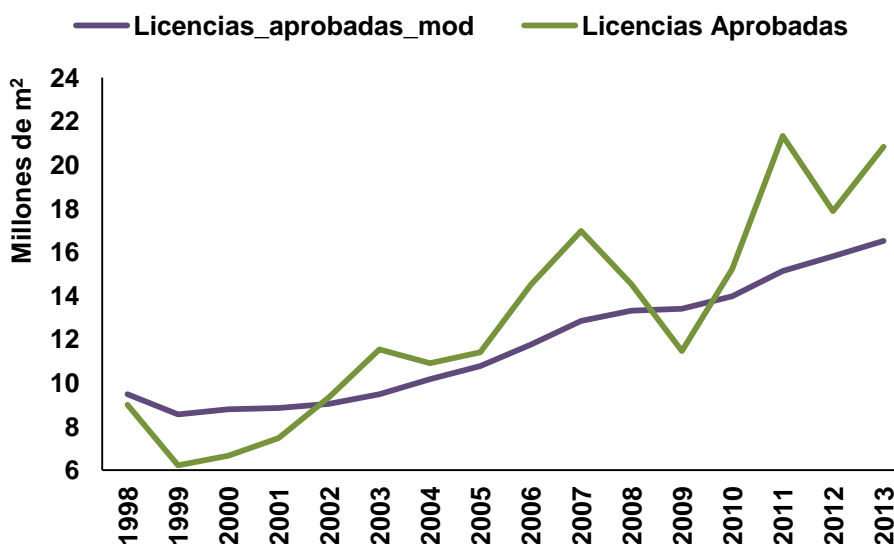
En la Tabla 12, se muestran los valores de los parámetros calibrados, estos resultados fueron obtenidos usando el método de algoritmos genéticos, el cual viene integrado en el software Powersim Studio 9, software en el que se desarrolló el modelo de simulación.

Tabla 12: Resultados, calibración de parámetros

Área por vivienda	Vida útil promedio de edificaciones	Tiempo demolición	Tasa de redensificación
68,22 m ² /vivienda	52,09 años	12,74 años	73%

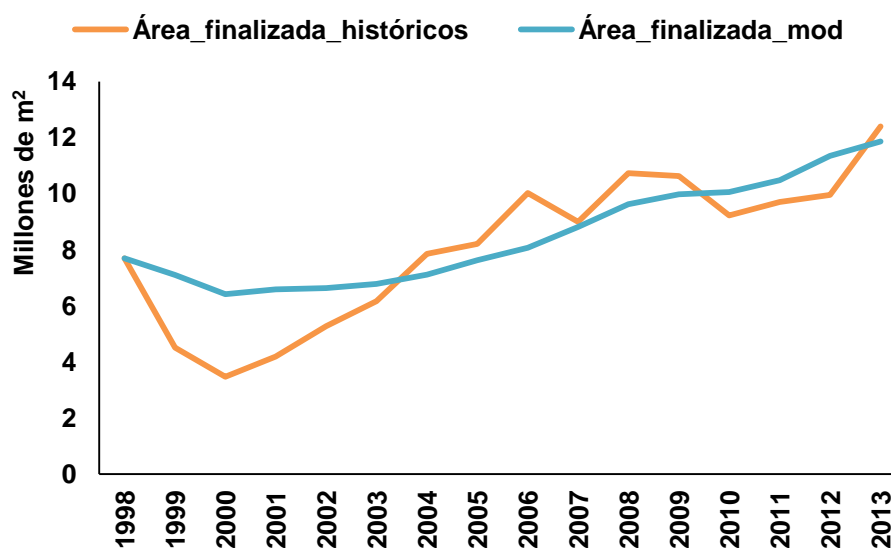
En la Tabla 12, se muestra el comportamiento de las licencias aprobadas, históricas y simuladas, para nuestro caso de estudio. Mientras que en la Figura 8, se muestra el comportamiento de las viviendas construidas, históricas y simuladas, para nuestro caso de estudio. Una inspección visual del modelo calibrado permite concluir que este, captura parte del comportamiento histórico, tanto de las licencias aprobadas, como del área finalizada.

Figura 8: Comportamiento de las licencias aprobadas; históricos y simulados.



Fuente: Elaboración propia

Figura 9: Comportamiento del área finalizada por año; históricos y simulados.



Fuente: Elaboración propia

En este capítulo, se presentó los resultados de la calibración del modelo y la validación de sus variables y parámetros más importantes, luego de haber realizado esta calibración y validación; en el siguiente apartado, se muestran los resultados de la simulación del modelo en el caso base, y en algunos escenarios considerados importantes a la hora de analizar, el comportamiento de la demanda de materiales de construcción de viviendas en Colombia.

6. Resultados

En el capítulo anterior, se presentó el modelo de Flujos Dinámicos de Materiales desarrollado por Müller (2006), aplicado al caso de estudio. Este modelo fue ajustado y calibrado con el objetivo de comprobar su capacidad para explicar la dinámica de los Flujos de Materiales de Construcción en Colombia, en el periodo 1998-2013. En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos por el modelo luego del proceso de validación y calibración, primero se presenta el análisis de los resultados arrojados por el modelo para el caso base, y a partir de este se presenta el análisis de algunos escenarios.

6.1 Análisis del caso base

El presente trabajo, se centra en el estudio de la demanda agregada de materiales de construcción de vivienda en Colombia. Teniendo en cuenta que cerca del 76% de la población Colombiana vive en áreas urbanas a 2014 (Banco Mundial, 2014), y que solo existe información pública disponible para las áreas urbanas de Bogotá, Cali, Barranquilla, Pereira, Armenia, Cartagena, Ibagué, Manizales, Villavicencio, Neiva, Pasto y Popayán; y para las áreas metropolitanas de Medellín, Bucaramanga y Cúcuta. En este estudio solo se consideran estas zonas.

El periodo de simulación comienza en el año 2013. El horizonte de tiempo en el que se evaluó el modelo fue de 49 años, con paso de tiempo anual. El modelo fue construido en Powersim Studio 9, Academic from Powersim Software AS. Las gráficas y el análisis de resultados fueron desarrollados en MS Excel. En el caso base se estudia la dinámica de los Flujos de Materiales de Construcción de Viviendas en Colombia. Para definir las condiciones iniciales de variables y parámetros, se tuvieron en cuenta las siguientes fuentes; Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, el DANE, CAMACOL, entre otras. La dinámica de los flujos de materiales de construcción de viviendas depende de licencias de construcción aprobadas, las técnicas de construcción usadas y la intensidad en el uso de los materiales en cada uno de los sistemas constructivos. Las licencias de construcción aprobadas dependen del PIB per cápita, y para el caso base se tomaron proyecciones del FMI sobre el PIB per cápita de Colombia en COP constantes 2005. Como se mencionó en la sección 2.2, las técnicas constructivas se tomaron del DANE, mientras que la intensidad en el uso de materiales por técnica constructiva se obtuvo de Salazar (2013).

6.1.1 Condiciones iniciales caso base

Los valores iniciales de las variables y los parámetros más importantes del modelo, usados en el caso base, fueron obtenidos de fuentes oficiales como el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL). Estos valores se muestran en la Tabla 13.

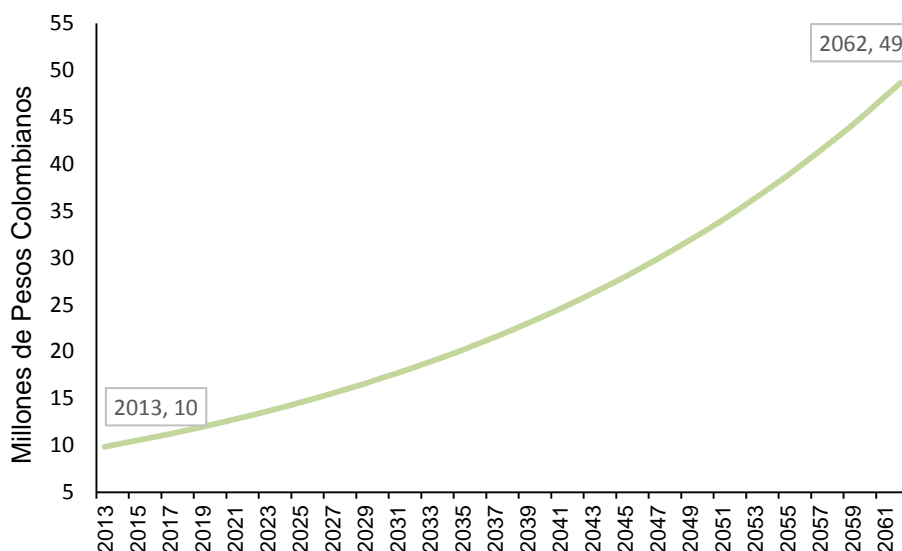
Tabla 13: Valores iniciales de las variables y parámetros más importantes, en el caso base.

Nombre	Unidades	Datos	Fuente
Área Construida	metro ²	1.448.721.825	Cálculos propios, con información del DANE (2013).
Área Disponible	metro ²	546.650.000	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia (2013), página 50. Disponible en línea: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/100anosdepolicashabitacionales.pdf
Hogares por vivienda	hogares/vivienda	1,04	Encuesta de calidad de vida de DANE (2013).
Personas por hogar	Personas/hogar	3,5	Encuesta de calidad de vida de DANE (2013).
Personas por vivienda	Personas/vivienda	3,64	Cálculos propios, con información del DANE (2013).
Vida útil promedio de edificaciones	Yr	61	González (2005).
Área por vivienda	metro ² /vivienda	100	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia (2013). http://camacol.co/sites/default/files/secciones_interinas/EE_Coy20100921091641.pdf

Las proyecciones del PIB per cápita, que se muestran en la Figura 10, fueron obtenidas del Fondo Monetario Internacional (FMI). Esta entidad tiene proyecciones hasta el año

2019 y de 2019 en adelante, se tomó el porcentaje de crecimiento de 2019 con respecto a 2018. Los valores están en Pesos Colombianos constantes al año 2005.

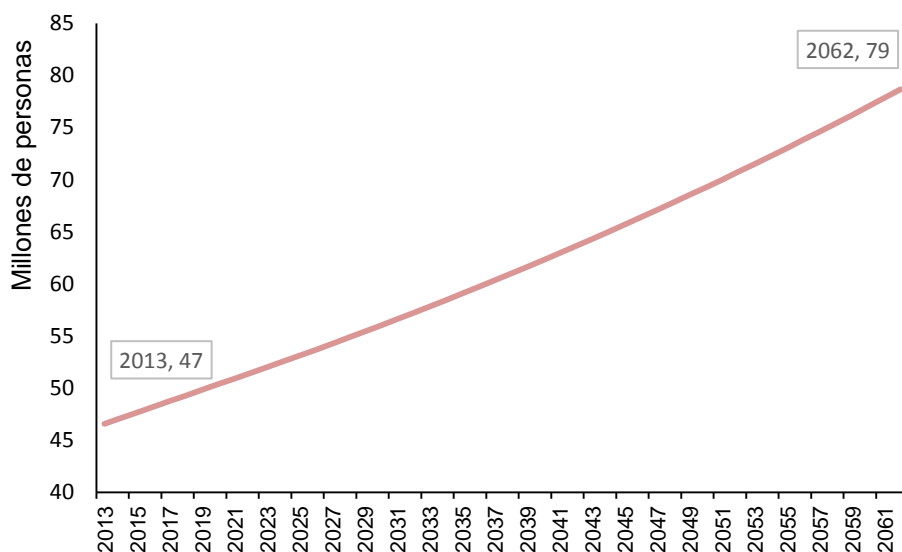
Figura 10: Proyecciones del PIB per cápita. Fuente: FMI



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11, se muestran las proyecciones de la población, usadas por el modelo tanto en el caso base, como en los demás escenarios evaluados. Estas proyecciones fueron obtenidas del DANE, esta entidad tiene datos públicos disponibles de proyecciones de población, hasta el año 2020, de este año en adelante, se usó el porcentaje de crecimiento de la población, de los dos últimos años para cuales hay datos disponibles.

Figura 11: Proyecciones de la población en Colombia. Fuente: DANE



Fuente: Elaboración propia

6.1.2 Resultados del modelo en el caso base

El análisis del caso base se centra en analizar el comportamiento de los flujos de materiales de construcción de vivienda en Colombia, observando como los cambios en la demanda de viviendas (por medio de las licencias de construcción), repercuten en la dinámica de la demanda de materiales de construcción.

La dinámica de los flujos de materiales de construcción en Colombia, se analiza teniendo en cuenta la evolución de la demanda de licencias de construcción para viviendas.

En la Tabla 14, se muestra el balance de materiales de construcción para los años 2013-2062. En este balance específicamente se muestra el acumulado en cuanto a entradas y salidas de materiales en millones de toneladas para los años: 2013, 2016, 2020, 2030, 2040, 2050 y 2062. Solo se muestran estos años, como una forma de mostrar la evolución en el consumo de materiales de construcción y de las demoliciones en el período de estudio. En dicho balance podemos observar que al año 2062, se habrán consumido en total 3.499 millones de toneladas de materiales y se habrán generado 1.282 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición. Del total de materiales que entran al sistema en este período, 1.669 millones de toneladas corresponden a materiales de las viviendas construidas en este período.

El decreto de presidencia 2060 de 2004, fijó el área mínima de las cesiones urbanísticas gratuitas para zonas verdes, parques o equipamientos en el 25% del área total aprobada en las licencias, esto para el caso de las viviendas tipo VIS, con lo cual tenemos que solo el 75% del área aprobada en las licencias, es realmente construible. Dentro de este porcentaje, entre el 15 y el 20% corresponde a espacio público (vías y andenes) (Decreto 2060, 2004).

De la Tabla 14, tenemos que a 2062 se habrán consumido 1.150 millones de toneladas de materiales en vías de acceso a las viviendas construidas en dicho período, y un total de 287 toneladas de materiales en andenes, como contribución en materia de espacio público.

Del balance de materiales también tenemos que, bajo las condiciones actuales, a 2062 los residuos generados de construcción y demolición en Colombia se multiplicarán, pasando de obtener cerca de 1.578 (millones de toneladas) de residuos de construcción y demolición en 2013, a 1.281.958 (millones de toneladas) en el año 2062. Esto se puede explicar por las bajas tasas de reciclajes de estos materiales que se presentan en la actualidad (cerca del 5% del total de los residuos de construcción y demolición son reciclados).

Tabla 14: Balance de materiales de construcción en millones de toneladas, obtenido a partir del modelo en el caso base, para el período 2013-2062.

Año	Material	Viviendas	Andenes	Vías	Otros usos	Total entradas	Salidas (Desechos)
2013	Agregados triturados	708,752	1,098	13,816	0,941	724,608	0,511
	Arena de Rio	699,082	0,884	11,248	0,773	711,988	0,486
	Cemento Gris	278,058	0,287	0,000	0,272	278,617	0,184
	Roca Muerta	280,057	0,056	1,312	0,081	281,506	0,169
	Cerámica Cocida	350,955	0,000	0,000	0,069	351,024	0,204
	Cemento Asfáltico	0,000	0,000	1,535	0,000	1,535	0,002
	Otros	36,746	0,000	0,000	0,067	36,812	0,022
	TOTAL	2.353,649	2,326	27,912	2,203	2.386,090	1,578
2016	Agregados triturados	10,911	2,849	11,948	3,243	28,951	4,552
	Arena de Rio	10,762	2,294	9,728	2,663	25,446	4,449
	Cemento Gris	4,281	0,745	0,000	0,937	5,963	1,755
	Roca Muerta	4,311	0,146	1,134	0,279	5,870	1,723
	Cerámica Cocida	5,403	0,000	0,000	0,239	5,642	2,146
	Cemento Asfáltico	0,000	0,000	1,328	0,000	1,328	0,001
	Otros	0,566	0,000	0,000	0,229	0,795	0,229
	TOTAL	36,233	6,034	24,138	7,590	73,995	14,855
2020	Agregados triturados	23,886	7,314	30,671	9,556	71,427	19,207
	Arena de Rio	23,560	5,889	24,970	7,847	62,266	18,800
	Cemento Gris	9,371	1,913	0,000	2,763	14,047	7,429
	Roca Muerta	9,438	0,374	2,912	0,821	13,546	7,317
	Cerámica Cocida	11,828	0,000	0,000	0,705	12,532	9,127
	Cemento Asfáltico	0,000	0,000	3,408	0,000	3,408	0,003
	Otros	1,238	0,000	0,000	0,675	1,914	0,983
	TOTAL	79,321	15,490	61,961	22,367	179,139	62,866

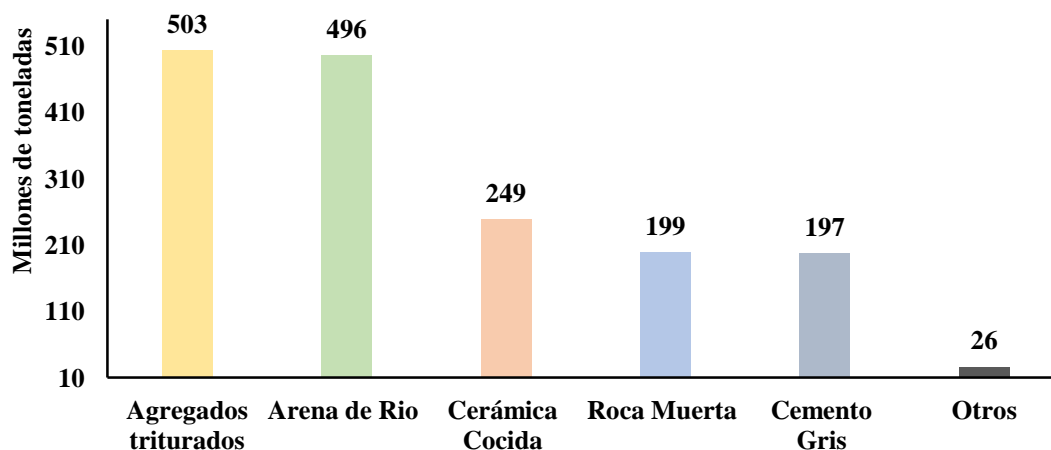
Año	Material	Viviendas	Andenes	Vías	Otros usos	Total entradas	Salidas (Desechos)
2030	Agregados triturados	63,052	22,527	94,467	29,803	209,849	77,960
	Arena de Rio	62,191	18,138	76,909	24,472	181,711	76,186
	Cemento Gris	24,736	5,892	0,000	8,616	39,244	30,094
	Roca Muerta	24,914	1,153	8,970	2,561	37,598	29,472
	Cerámica Cocida	31,221	0,000	0,000	2,198	33,419	36,748
	Cemento Asfáltico	0,000	0,000	10,496	0,000	10,496	0,011
	Otros	3,269	0,000	0,000	2,106	5,375	4,032
	TOTAL	209,384	47,711	190,842	69,755	517,692	254,503
2040	Agregados triturados	132,933	45,299	189,959	58,332	426,522	159,100
	Arena de Rio	131,120	36,473	154,653	47,898	370,143	155,078
	Cemento Gris	52,152	11,848	0,000	16,863	80,864	61,166
	Roca Muerta	52,527	2,319	18,036	5,013	77,896	59,397
	Cerámica Cocida	65,825	0,000	0,000	4,301	70,126	73,974
	Cemento Asfáltico	0,000	0,000	21,107	0,000	21,107	0,022
	Otros	6,892	0,000	0,000	4,122	11,014	8,278
	TOTAL	441,450	95,939	383,755	136,529	1.057,672	517,014
2050	Agregados triturados	257,834	78,543	329,364	98,280	764,021	258,449
	Arena de Rio	254,317	63,239	268,149	80,701	666,405	251,127
	Cemento Gris	101,154	20,544	0,000	28,411	150,109	98,857
	Roca Muerta	101,881	4,020	31,273	8,447	145,621	95,009
	Cerámica Cocida	127,673	0,000	0,000	7,247	134,920	118,144
	Cemento Asfáltico	0,000	0,000	36,596	0,000	36,596	0,037
	Otros	13,368	0,000	0,000	6,944	20,312	13,555
	TOTAL	856,226	166,346	665,382	230,030	1.917,983	835,178
2062	Agregados triturados	502,608	135,820	569,553	167,531	1.375,512	397,241

Año	Material	Viviendas	Andenes	Vías	Otros usos	Total entradas	Salidas (Desechos)
	Arena de Rio	495,751	109,356	463,697	137,565	1.206,369	385,549
	Cemento Gris	197,183	35,525	0,000	48,431	281,140	151,927
	Roca Muerta	198,601	6,952	54,079	14,399	274,030	145,228
	Cerámica Cocida	248,878	0,000	0,000	12,353	261,231	180,704
	Cemento Asfáltico	0,000	0,000	63,284	0,000	63,284	0,000
	Otros	26,058	0,000	0,000	11,837	37,895	21,309
	TOTAL	1.669,079	287,653	1.150,612	392,117	3.499,461	1.281,958

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados del modelo de simulación desarrollado en Powersim Studio 9.

En la Figura 12, se muestra un resumen del consumo de materiales de construcción de viviendas durante el período 2013-2062, de esta figura tenemos que, para el caso de las viviendas, los materiales más usados son los agregados triturados con alrededor de 503 millones de toneladas, seguido de la arena de río con 496 millones de toneladas, la cerámica con 249 millones de toneladas, la roca muerta con 199 toneladas y el cemento gris con 197 toneladas. El caso base muestra que el consumo de agregados triturados y de arena de río es crítico para el sector de la construcción de vivienda; por lo tanto, es importante evaluar que tan cerca están las fuentes de extracción de estos materiales de las grandes ciudades y las capacidades de producción de estas canteras, como una forma de prever posibles problemas de abastecimiento.

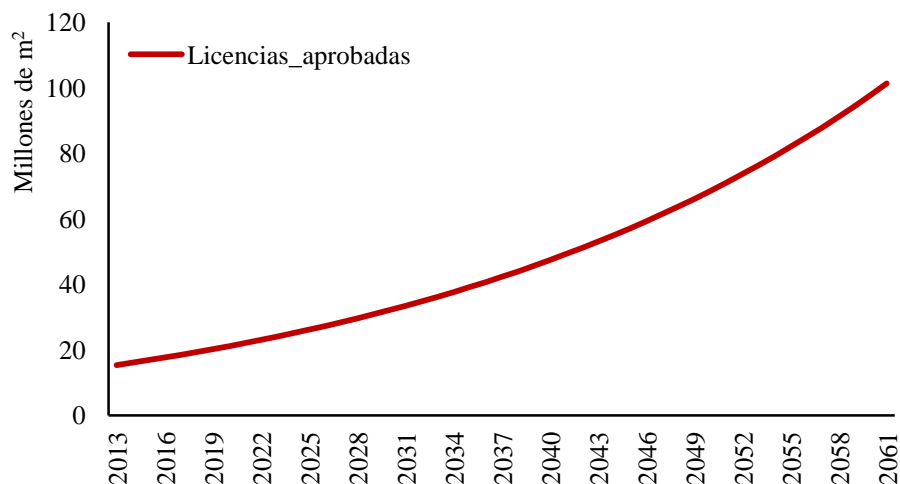
Figura 12: Entradas Netas de Materiales al Sistema: Caso Base



Fuente: Elaboración propia

Tanto el consumo de materiales, que se muestra en la Figura 12, como el balance de materiales, que se muestra en la Tabla 14, resultan de la actividad constructora cuya dinámica se explica a continuación.

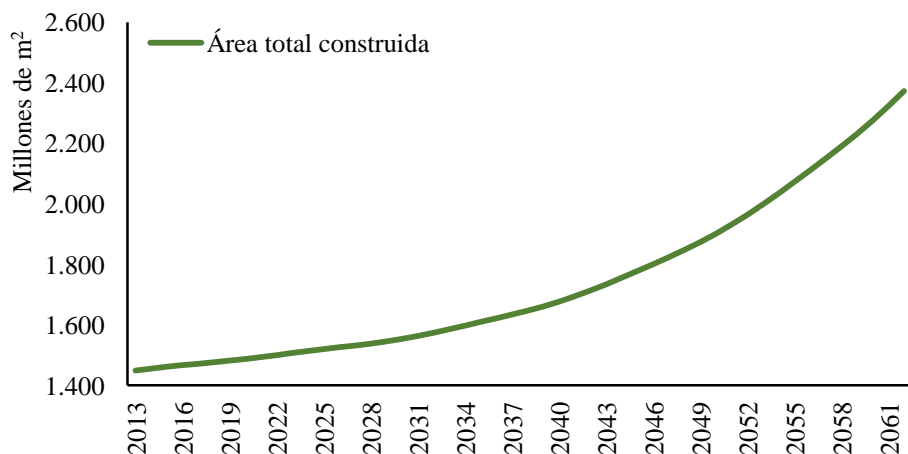
Figura 13: Licencias aprobadas para el caso base: 2013-2062.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 13, se muestra que las licencias aprobadas tienden a crecer en promedio un 10% cada año entre 2013 y 2061, alcanzando valores cinco veces por encima de las licencias aprobadas a 2013. Dado que como resultado de la formación de hogares, y aunque se adelanten políticas tendientes a disminuir el déficit de vivienda existente, la demanda de vivienda tiende a aumentar durante este período.

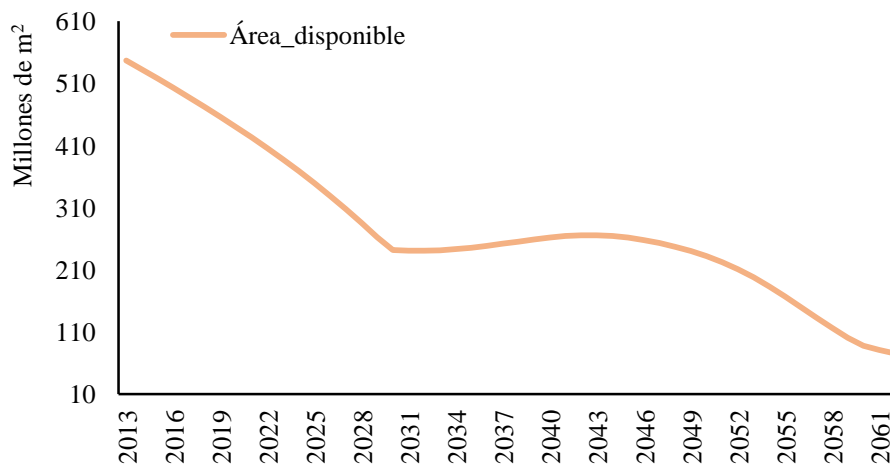
Figura 14: Área total construida para el caso base: 2013-2062.



Fuente: Elaboración propia

De la Figura 14, tenemos que el área total construida crece un 60% entre 2013 y 2061. Esto, dado que la población crecerá en este período un 68,7% (DANE), y si la población crece, también aumenta la formación de nuevos hogares, y estos nuevos hogares demandarán viviendas.

Figura 15: Área total disponible para el caso base: 2013-2062.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 15, tenemos que el área disponible disminuye en un 54% entre 2013 y 2030. A partir de 2030, se libera área de las demoliciones y el área disponible tiende a estabilizarse entre 2030 y 2046, pasando de 240 a 247 millones de metros cuadrados en este período. Sin embargo, entre 2047 y 2062 vuelve a disminuir a un 68%, pasando de 253.196.278 metros cuadrados disponibles para construcción de viviendas en el año 2047 a 75.391.450 metros cuadrados a 2062.

En general tenemos que, bajo las condiciones consideradas en el caso base, para el período 2013-2062, se incrementará la demanda de viviendas en Colombia alrededor del 60%, esto como respuesta al crecimiento poblacional, la formación de hogares y las perspectivas económicas para el país.

Finalmente, del grupo de los principales materiales de construcción, los agregados y las arenas, son los materiales que serán más demandados, lo cual implica retos tanto para los constructores, como para los gobiernos regionales, locales y nacional, dada la gran informalidad en la extracción de estos, y su impacto ambiental (Escobar & Martínez, 2014).

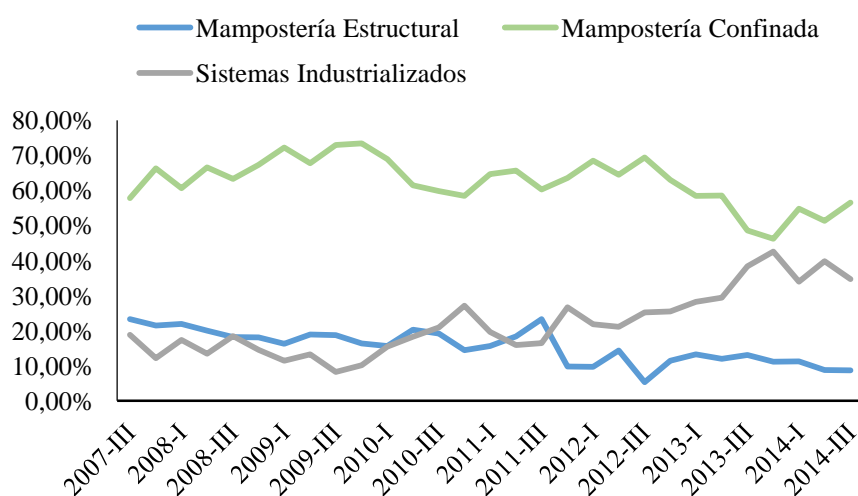
6.2 Análisis de escenarios

A la hora de analizar el comportamiento futuro de los flujos de materiales de construcción en Colombia, es importante analizar las posibles tendencias en cuanto a consumo de materiales, que dependen del uso de cada uno de los sistemas constructivos, los diferentes escenarios de crecimiento económicos para el país (PIB), dado que si la economía del país está bien, la gente tiene recursos para comprar viviendas, y si hay demanda de viviendas, habrá demanda de materiales de construcción. En este capítulo, se evalúa un escenario en cuanto al uso de los sistemas constructivos, un escenario de crecimiento del PIB y uno en cuanto a la densidad de ocupación de las viviendas.

6.2.1 Predominio del sistema de construcción industrializado

Los datos disponibles sobre construcción de viviendas por sistema constructivo en Colombia (Figura 16), indican que el sistema industrializado ha venido ganando terreno respecto a los otros sistemas en los últimos años, lo cual puede ser explicado en parte a la necesidad de optimizar el uso del suelo en las grandes ciudades, dada su escasez (CAMACOL, 2010), optimizar el uso de las materias primas, dadas la restricciones y la informalidad en su extracción, y por último, la necesidad cubrir la demanda de viviendas a costos razonables.

Figura 16: Participación, sistemas constructivos.



Fuente: DANE.

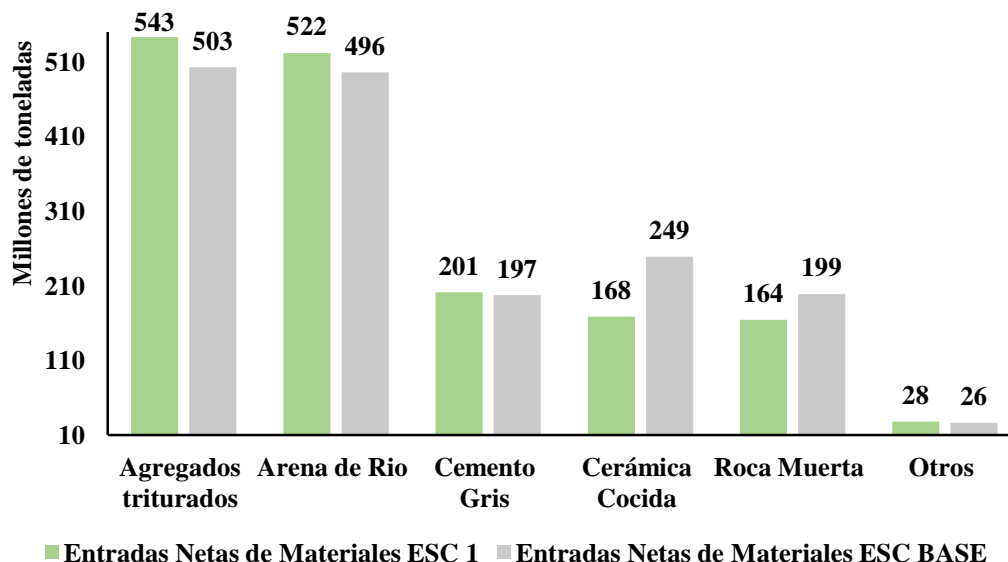
En la Tabla 15, se muestran los porcentajes de participación de cada sistema constructivo, usados en el escenario 1. Estos valores se tomaron a partir del último dato disponible a la fecha, en el DANE. En la Figura 16, se muestran los porcentajes de participación de cada sistema constructivo en la construcción de viviendas en Colombia, para el caso base se tomaron los porcentajes de participación correspondientes al último período disponible a la fecha (tercer trimestre de 2014), y para el caso 1 (ESC 1), se tomó los mismos porcentajes que el caso base (ESC BASE), asumiendo que el Sistema Industrializado tendrá la participación del sistema mampostería confinada y que el sistema mampostería confinada presenta el porcentaje de participación del sistema industrializado, con lo cual el sistema industrializado sería el sistema más usado.

Tabla 15: Participación de los Sistemas Constructivos en el caso base (ESC BASE) y en el escenario 1 (ESC 1).

	Mampostería Estructural	Mampostería Confinada	Sistemas Industrializados
ESC 1	8,75%	34,76%	56,50%
ESC BASE	8,75%	56,50%	34,76%

En la Figura 17, se muestran los consumos de cada uno de los principales materiales de construcción usados en Colombia para el caso base (ESC BASE) y para el caso en el que sistema constructivo predominante es el sistema industrializado (ESC 1). En el caso base, cuando el sistema constructivo predominante es el sistema Mampostería Confinada, se consumen 1.670 millones de toneladas, mientras que cuando el sistema predominante es el sistema Industrializado, se consumen 1.626 millones de toneladas, lo cual representa 44 millones de toneladas, menos cuando predomina el sistema Industrializado frente al caso base. Estos resultados muestran que, si bien, en términos generales las construcciones bajo el sistema industrializado poseen menos intensidad en el uso de los materiales que los demás sistemas. En los principales materiales: Agregados triturados, arena de río y cemento gris, el consumo de materiales cuando el sistema industrializado es el sistema predominante, es superior al que se presenta en el caso base.

Figura 17: Entradas Netas de Materiales al Sistema. Caso Base (ESC BASE) vs Escenario 1 (ESC 1).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de la simulación en PowerSim Studio 9.

De la Figura 17, tiene en cuenta que el sistema industrializado es el sistema constructivo que menos intensidad de materiales por metro cuadrado construido requiere (Tabla 3), que la tendencia en el uso de los sistemas constructivos en últimos años muestra que el sistema constructivo industrializado, cada año gana mayor terreno respecto a las otras técnicas, se prevé que para los próximos años, el sistema constructivo industrializado se impondrá por encima de los otros.

6.2.2 Cambios en el crecimiento económico

Dado que la actividad constructora depende del comportamiento de la economía del país, es importante evaluar diferentes escenarios de crecimiento económico, en particular para el PIB per cápita. En esta sección se evalúa el comportamiento del sector de la construcción de viviendas en Colombia, bajo cuatro escenarios del PIB; cuando el PIB presenta el comportamiento proyectado por el FMI para Colombia (ESC BASE),

cuando presenta el comportamiento proyectado por el FMI para Latinoamérica y el caribe (ESC PIB 1), cuando el comportamiento está 0.2 puntos porcentuales por encima (ESC PIB 2) y 0.2 puntos porcentuales por debajo (ESC PIB 3) de las proyecciones del FMI para el PIB de Colombia. Los porcentajes de crecimiento del PIB usados en cada uno de los escenarios, se muestran en la Tabla 16.

En el modelo se trabaja el PIB per cápita en pesos colombianos, para el año inicial (2013), se tomó el valor del PIB para Colombia en pesos del año 2005, reportado por el FMI, y se dividió entre el número de habitantes reportados por el DANE para dicho año: a 2013 en Colombia habían 47.121.089 habitantes, y el PIB en pesos Colombianos del año 2005 fue de 464,701 billones de pesos, para hallar el PIB per cápita se divide el PIB total entre el número de habitantes, con lo cual tenemos que a 2013 teníamos un PIB per cápita de 9.861.853 pesos Colombianos del año 2005. Para los años posteriores a 2013, se usó cada uno de los porcentajes de crecimiento correspondientes.

Tabla 16: Escenarios de crecimiento para el PIB per cápita colombiano. Años 2013-2062.

ESCENARIOS DE CRECIMIENTO DEL PIB PARA COLOMBIA	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2040	2050	2062
ESC BASE:											
Proyecciones FMI Colombia	4.27	4.49	4.47	4.52	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	45
ESC PIB 1:											
Proyecciones FMI para Latinoamérica y el caribe	2.5	0.8	1.7	2.9	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
ESC PIB 2: 0.2 puntos porcentuales Por encima de proyecciones FMI Colombia											
	6.27	6.49	6.47	6.52	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	47
ESC PIB 3: 0.2 puntos porcentuales Por debajo proyecciones FMI Colombia											
	2.27	2.49	2.47	2.52	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	43

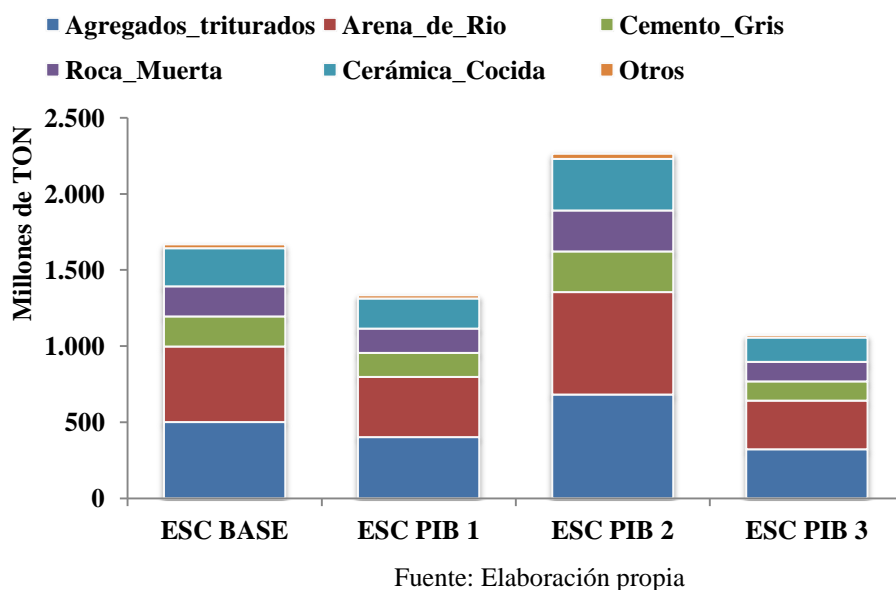
Fuente: se usan las proyecciones de crecimiento del FMI para el PIB de Colombia y para el PIB de Latinoamérica y el caribe para los años 2013-2017, del 2018 en adelante se asume el crecimiento del año 2017.

Tabla 17: Consumo de materiales para cada escenario del PIB considerado, en millones de Toneladas.

	Agregados Triturados	Arena de Rio	Cemento Gris	Roca Muerta	Cerámica Cocida	Otros	Total
ESC BASE	503	496	197	199	249	26	1,669
ESC PIB 1	402	397	158	159	199	21	1,335
ESC PIB 2	682	673	268	270	338	35	2,265
ESC PIB 3	323	319	127	128	160	17	1,073

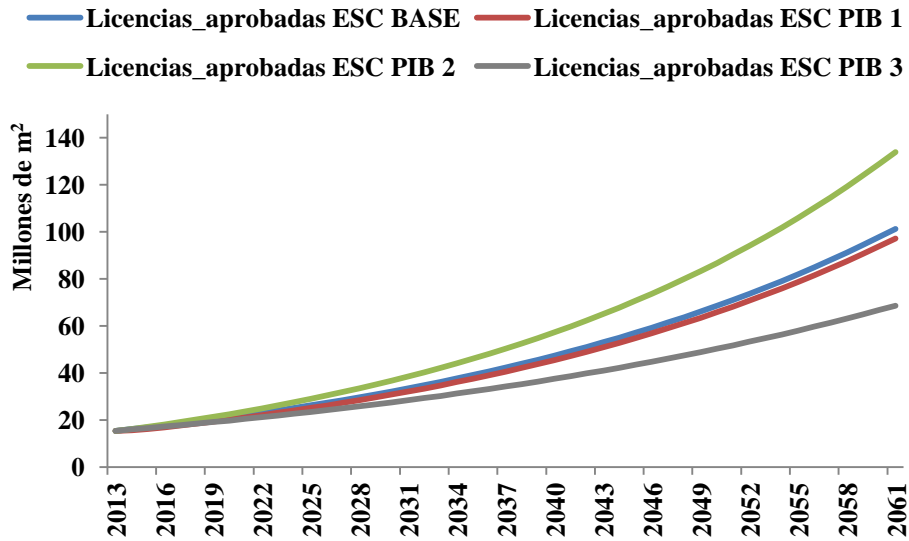
Fuente: elaboración propia, a partir de los resultados obtenidos de la simulación en PowerSim Studio 9.

Figura 18: Consumo de materiales en cada uno de los escenarios de crecimiento del PIB



En la Figura 18 y en la Tabla 17, se muestra el consumo de materiales de construcción en los escenarios de la Tabla 16. De la Tabla 17, tenemos que si consideramos las proyecciones del FMI para el PIB de Latinoamérica y el Caribe para el período 2013-2062, el consumo de materiales disminuye un 20% en este período, dado que las proyecciones del PIB para Latinoamérica y el Caribe del FMI, son menores a las proyecciones de la misma entidad para Colombia (ESC BASE). Si se aumenta en un 2% las proyecciones del PIB para Colombia dadas por el FMI, se observa que el consumo de materiales aumenta un 35,7% en el período 2013-2062, mientras que si las proyecciones del PIB para Colombia se sitúan un 2%, por debajo de los valores proyectados por el FMI para el país, el consumo de materiales disminuye un 35,6% en dicho período. Los resultados anteriores, muestran que el consumo de materiales de construcción está ligado al crecimiento del PIB del país; si el PIB aumenta, aumenta el consumo de materiales de construcción, y si el PIB disminuye, de igual forma disminuye el consumo de estos materiales.

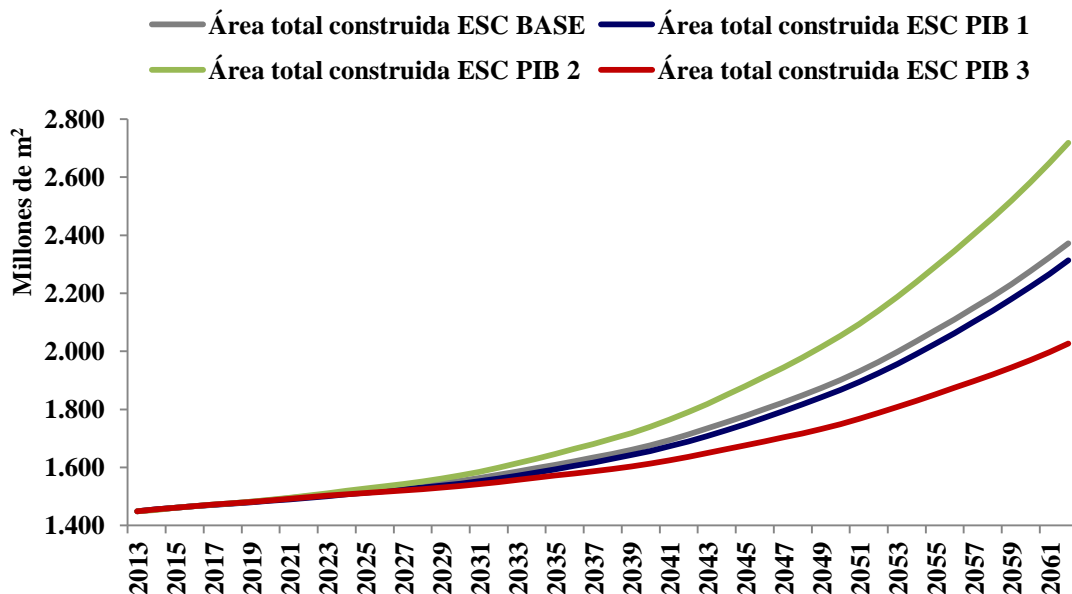
Figura 19: Licencias aprobadas para construcción de vivienda en cada uno de los escenarios de crecimiento del PIB.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 19, se muestra que las licencias aprobadas dependen de la tasa de crecimiento del PIB. Si el PIB crece un 2%, las licencias aprobadas crecen un 22,7% y si el PIB decrece un 2%, las licencias decrecen un 22,7%. Si el PIB para Colombia presentara el comportamiento de la región, las licencias decrecerían un 4%, con respecto al caso en el que el PIB presente el comportamiento esperado para Colombia según proyecciones del FMI.

Figura 20: Área total construida en cada uno de los escenarios de crecimiento del PIB.

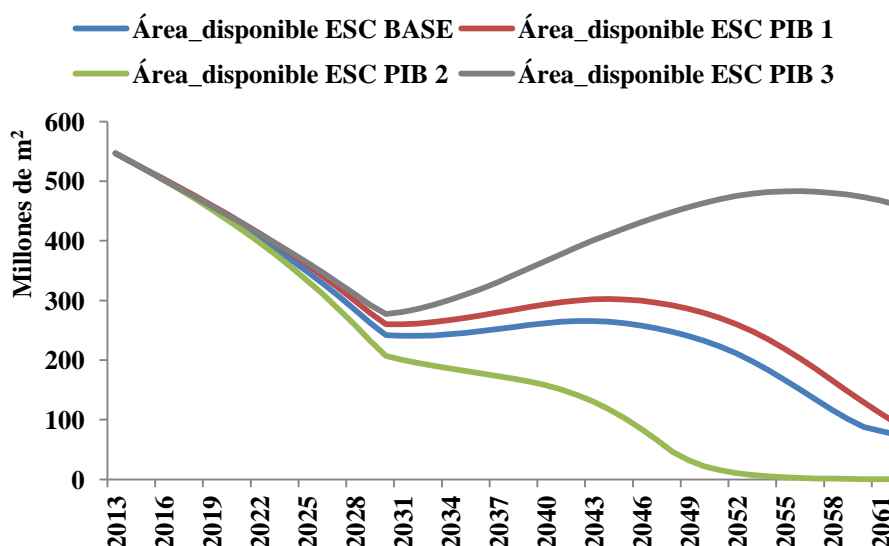


Fuente: Elaboración propia

En la

Figura 20, se muestra el área total construida en los 4 escenarios de crecimiento del PIB de la Tabla 17. En esta figura, se muestra la dependencia del sector de la construcción del crecimiento económico del país, medido por medio del PIB per cápita. Si el PIB aumenta un 2% cada año, durante el período 2013-2062, la construcción de vivienda lo hace en un 22,7% en dicho período con un promedio de 0,5% anual.

Figura 21: Área disponible en cada uno de los escenarios de crecimiento del PIB.



Fuente: Elaboración propia

6.2.3 ¿Qué pasa si el área por vivienda responde a una distribución de probabilidad?

En el caso base se considera el área por vivienda un parámetro con un valor fijo; sin embargo, en esta sección se evalúa que sucede si se considera que este parámetro se ajusta a una distribución de probabilidad, teniendo en cuenta los datos históricos disponibles. Las pruebas de bondad de ajuste fueron realizadas en el software STATGRAPHICS Centurion, y los resultados obtenidos en esta, se muestran en la Tabla 18. Para realizar estas pruebas, se tomaron 17 valores entre 1998 y 2014, con un rango desde 72,5224 a 99,8985 metros cuadrados por vivienda.

Tabla 18: Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Área/Vivienda. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

DISTRIBUCIÓN AJUSTADA	Normal	Triangular
Media	90.05	NA
Desviación estándar	10.0933	NA
Límite inferior	NA	66.2925
Punto central	NA	99.9071
Límite superior	NA	99.8985

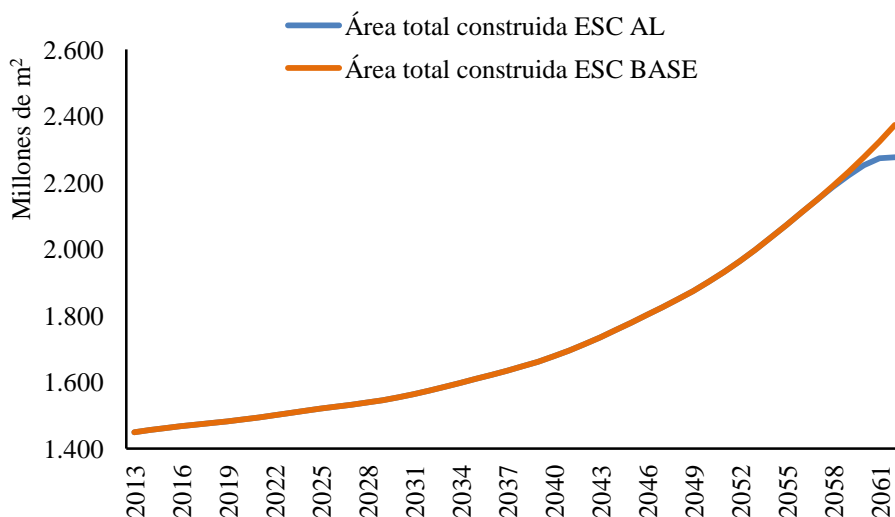
DMAS	0.164595	0.136287
DMENOS	0.168208	0.267465
DN	0.168208	0.267465
Valor-P	0.721964	0.175733

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 18, tenemos que los datos del área por vivienda se pueden ajustar a una distribución normal.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por el modelo, modelando el área por vivienda como una variable aleatoria con distribución normal, los resultados que se muestran corresponden al promedio obtenido con 30 simulaciones.

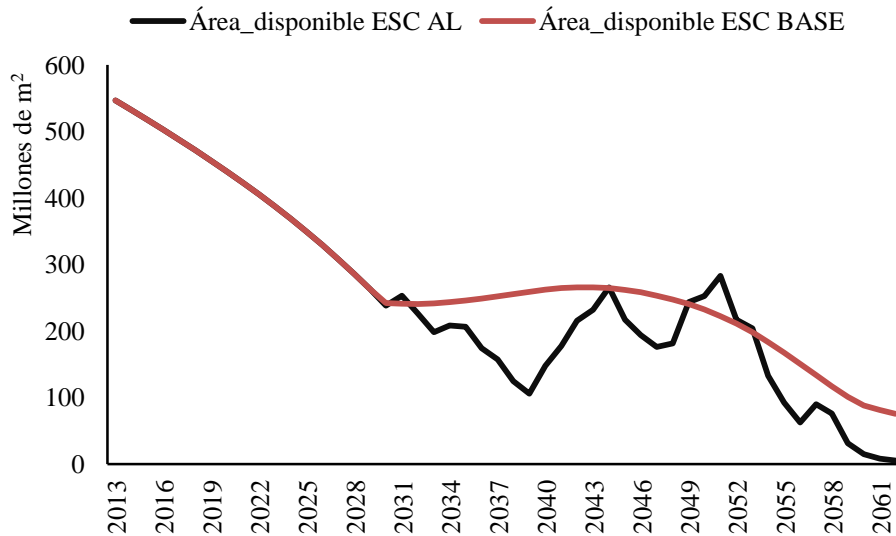
Figura 22: Área total construida cuando el área por vivienda es: constante (ESC BASE) vs cuando se modela como una normal (ESC AL).



Fuente: Elaboración propia

De la Figura 22, tenemos que, el área total construida es similar en los dos escenarios considerados (donde ESC BASE representa los valores cuando el área por vivienda es un valor fijo, y ESC AL, cuando el área por vivienda es ajustada a una distribución normal), dado que el rango de variación de los datos del área por vivienda, es bajo. Los resultados que se muestran para el ESC AL (escenario donde el área por vivienda es una variable aleatoria), corresponden al promedio de treinta simulaciones.

Figura 23: Área disponible cuando el área por vivienda es: constante (ESC BASE) vs cuando se modela como una normal (ESC AL).



Fuente: Elaboración propia

De la Figura 22, tenemos que el área total construida cuando el área por vivienda es constante (ESC BASE) y cuando el área disponible es una variable aleatoria (ESC AL), tiene valores parecidos, por lo tanto no se observan mayores cambios en las licencias aprobadas. De la Figura 23, tenemos que, el área disponible presenta un comportamiento similar hasta el año 2030, luego de lo cual, para el caso de que el área por vivienda se representa mediante distribución normal (ESC AL), el área disponible presenta un comportamiento cíclico, aunque siguiendo la misma tendencia de decrecimiento que se presenta en el caso base.

Para terminar, este capítulo presentó los resultados arrojados por el modelo sobre el comportamiento de la demanda de materiales de construcción en Colombia para el período 2013-2062. De los resultados arrojados en el análisis de los escenarios tenemos que el modelo desarrollado es muy sensible al comportamiento del PIB per cápita, ya que, si consideramos las proyecciones del FMI para el PIB de Latinoamérica y el Caribe para el período 2013-2062, el consumo de materiales disminuye un 20% en este período con respecto al caso base (con proyecciones del PIB del FMI para Colombia), dado que las proyecciones del PIB para Latinoamérica y el Caribe del FMI, son menores a las proyecciones de la misma entidad para Colombia (ESC BASE). Si se aumenta en un 2% las proyecciones del PIB para Colombia dadas por el FMI, se observa que el consumo de materiales aumenta un 35,7% en el período 2013-2062, mientras que si las proyecciones del PIB para Colombia se sitúan un 2%, por debajo de los valores proyectados por el FMI para el país, el consumo de materiales disminuye un 35,6% en dicho período. Los resultados anteriores muestran que el consumo de materiales de construcción está ligado al crecimiento del PIB del país, si el PIB aumenta, lo hace también el consumo de materiales de construcción, y si el PIB disminuye, de igual forma disminuye el consumo de estos materiales.

El consumo de materiales de construcción depende de las técnicas de construcción usadas, de los resultados del análisis de escenarios tenemos que, cuando el sistema constructivo predominante es el sistema Mampostería Confinada, se consumen 1.670 millones de toneladas, mientras que cuando el sistema predominante es el sistema Industrializado, se consumen 1.626 millones de toneladas, lo cual representa 44 millones de toneladas menos, cuando predomina el sistema Industrializado frente al caso base.

6.2.4 Impactos ambientales en los flujos de materiales de construcción de vivienda en Colombia

El sector de la construcción consume grandes volúmenes de materias primas y a la vez genera enormes cantidades de residuos, producto de los procesos de construcción y demolición de edificios. En este sentido, el reciclaje de los RCD representa un beneficio ambiental importante, ya que contribuye a mitigar el agotamiento de los recursos no renovables y a su vez, disminuir la cantidad de residuos depositados en los vertederos, prolongando la vida útil de estos (Castaño, Lasso, Rodríguez, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013).

La generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD's) genera una preocupación constante en los países por el impacto en el medio ambiente dado el impacto sobre grandes zonas naturales las cuales son usadas como espacios para la disposición final de estos residuos. Aunque en Colombia existen documentos, normas, resoluciones, leyes y guías que buscan una adecuada gestión de Residuos de Construcción y Demolición, el control y seguimiento al cumplimiento de estas normas y directrices resulta ineficiente y la mayor parte de estos residuos terminan en zonas públicas o botaderos ilegales (Castaño, Lasso, Rodríguez, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013). Los casos en los cuales se aprovecha el potencial de los RCD que se generan en aplicaciones para las mismas construcciones, son muy pocos, cerca del 5% (Castaño, Lasso, Rodríguez, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013). Mientras que, en países como Alemania (86%), Holanda (98%), Dinamarca (94%) y Reino Unido (75%), se aprovecha gran parte de los Residuos de Construcción y Demolición que se generan (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

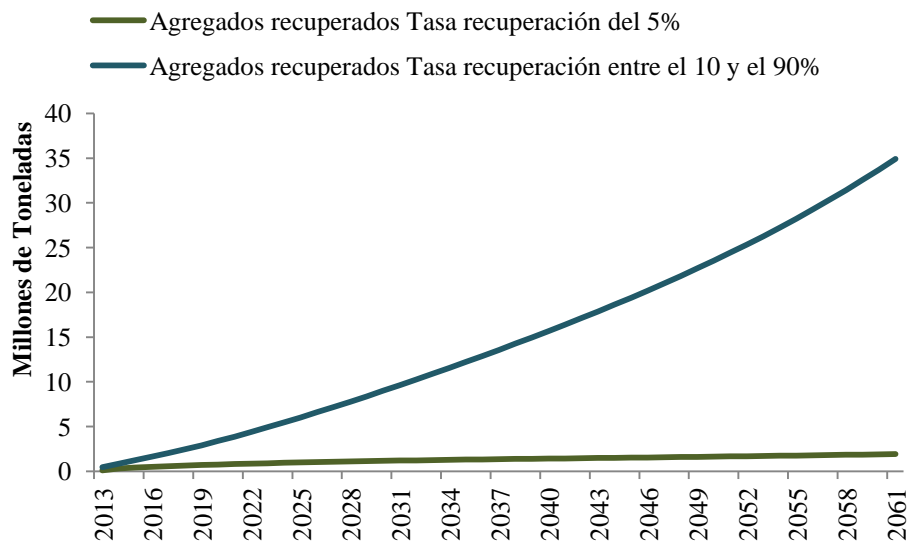
País	Tasa de reciclaje(%)	Fuente
Dinamarca	94%	European Commission, 2011; Calvo & Otros, 2014.
Estonia	92%	
Finlandia	26%	
Francia	45%	
Alemania	86%	
Grecia	5%	
Hungría	16%	
Irlanda	80%	
Letonia	46%	
Lituania	60%	

Luxemburgo	46%	
Holanda	98%	
Polonia	28%	
Portugal	5%	
Slovenia	53%	
España	14%	
Reino Unido	75%	
EU	46%	
Australia	51%	Hendriks & Pietersen, 2000
Brasil	8%	Hendriks & Pietersen, 2000
Japón	65%	Construction Material Recycling Association, 2005; Hendriks & Pietersen, 2000

Fuente: elaboración a partir de (Pacheco-Torgal, Tam, Labrincha, Ding, & De Brito, 2013)

En esta tesis se asume una tasa baja de reciclaje, que refleja las condiciones actuales y es una estimación conservadora de lo que se recicla efectivamente. Se modelan dos escenarios, como una forma de mostrar el potencial del reciclaje.

Figura 24: agregados recuperados con tasa de reciclaje del 5% vs tasa de reciclaje aumentando entre el 10 y el 90%



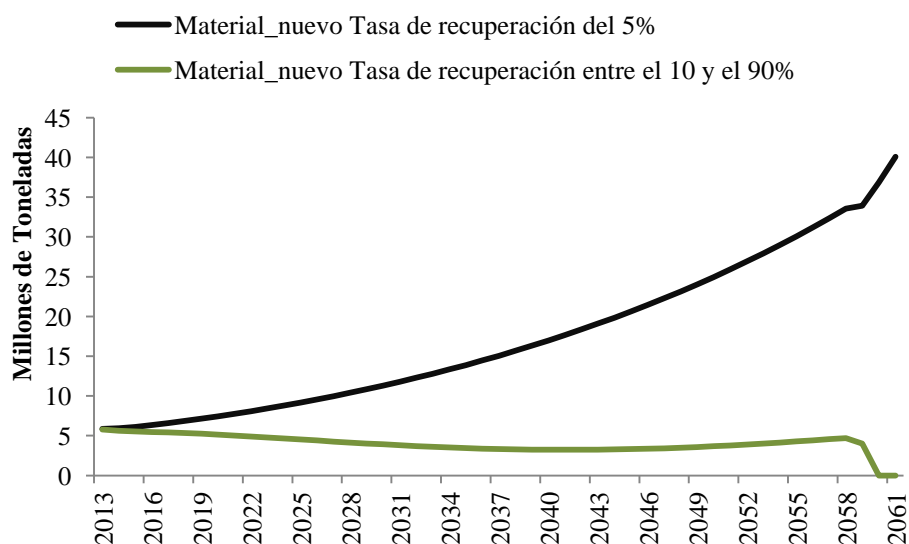
Fuente: Elaboración propia

Aunque en el sector de la construcción, se generan una gran cantidad de residuos de diferentes tipos, el mayor potencial de aprovechamiento de los materiales residuos de construcción y demolición al ser reciclados, como diferentes tipos de agregados, son materias primas para la producción de ladrillos, diferentes tipos de hormigón, entre otros uso. Estos materiales representan entre el 80% y el 90% de los residuos de construcción y demolición, y recuperados, pueden ser usados como substitutos de

materiales extraídos de canteras. El porcentaje restante (entre el 10 y el 20%), aunque no es aprovechable en el sector de la construcción, pueden ser recuperados para usos distintos (Castaño, Lasso, Rodríguez, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013).

En la Figura 24, los agregados recuperados cuando la tasa de recuperación de los residuos de construcción y demolición es igual al 5% (caso base) frente a una tasa de reciclaje creciente con valores entre el 10 y el 90%. De esta figura, tenemos que para una tasa de reciclaje del 5%, los niveles de recuperación de agregados son mínimos, casi que tendientes a cero (Toneladas), mientras que cuando se varía la tasa de reciclaje entre el 10 y el 90%, tenemos que, al aumentar la tasa de reciclaje aumenta considerablemente la cantidad de agregados recuperados, cabe resaltar que la mayor parte de los materiales residuos de construcción y demolición, se recuperan como agregados.

Figura 25: materiales nuevos usados (agregados), con tasa de reciclaje del 5% vs tasa de reciclaje aumentando entre el 10 y el 90%



Fuente: Elaboración propia

De la Figura 25, tenemos que a medida que aumenta la tasa de reciclaje, entre el 10 y el 90%, disminuye la cantidad de material nuevo que se requiere extraer de las canteras para producir viviendas. Mientras que para tasa de reciclaje bajas (5%), el impacto sobre la demanda de materiales nuevos es bajo, puesto que en la gráfica se observa que la demanda de materiales nuevos aumenta durante el período considerado en el estudio.

7. Discusión de Resultados

Según la investigación, los materiales de construcción de vivienda más usados en Colombia, sin importar que tipo de técnica constructiva se utilice, son: Agregados Triturados, Arena de Río, Cerámica cocida, Roca Muerta y Cemento Gris. Estos materiales representan entre el 80% y el 90% del peso de una obra; a su vez, son materiales extraídos o que utilizan materias primas provenientes de canteras.

Asimismo, se detectó que las restricciones ambientales a la extracción de materiales de construcción de canteras son más estrictas cada día; lo cual, ha obligado a que las canteras, de las cuales se extraen los materiales, se alejen cada vez más de los sitios de demanda, aumentando los costos de construcción de las viviendas y esto se refleja en un aumento en el precio de las viviendas, lo cual desestimula la compra de viviendas y la demanda por edificaciones nuevas.

De igual forma, en el desarrollo de la investigación, se reveló que la mayor parte de las canteras de extracción de materiales de construcción, en Colombia, son ilegales; carecen de licencias mineras, dado que las normas que rigen a los constructores se vuelven cada día más estrictas. Si sumamos lo anterior, a las restricciones a la extracción legal de materiales de construcción, en las principales ciudades de Colombia, surge la necesidad de garantizar el suministro de materiales de construcción a las obras. Una de las alternativas ante el aumento en los costos, tanto ambientales como económicos de la extracción de materiales nuevos de canteras, es el reciclaje de materiales de construcción de demolición, como una oportunidad de reciclaje de residuos de construcción y demolición, dado que el potencial de aprovechamiento en las obras es de más del 80%.

Asimismo, el modelo construido, muestra que en los próximos años la demanda de vivienda tiende a aumentar, a pesar de los esfuerzos del gobierno colombiano, por disminuir el déficit cuantitativo de vivienda a través de políticas públicas, como las viviendas gratis y subsidios a la tasa de interés. Esto debido a que la población seguirá aumentando y a medida que la población se incrementa, se acrecienta también la formación de hogares y estos a su vez demandan nuevas viviendas.

8. Conclusiones

En esta investigación, desarrolló un modelo de simulación que representa la dinámica de los flujos de materiales de construcción de viviendas en Colombia. El modelo sirve de apoyo a la toma de decisiones a nivel gubernamental, en el planteamiento de políticas públicas y a las empresas pertenecientes al sector de la construcción de viviendas; es decir, da señales sobre el comportamiento del consumo de materiales de construcción de viviendas en Colombia.

En ese sentido, el modelo se construyó a partir de la metodología propuesta por Müller (2006), para el análisis de flujos de materiales, ajustado a las condiciones particulares de Colombia. Para lo cual, se usaron las técnicas de calibración propuestas por Karnon & Vanni (2011) y los métodos integrados al software Powersim Studio 9.

Lo anterior señala, que el comportamiento de la actividad constructora es determinado usando técnicas econométricas, mientras que los flujos de materiales y sus acumulaciones son determinados a partir del enfoque de metabolismo industrial. Por lo cual, se seleccionó como técnica para el análisis del comportamiento de los flujos de materiales, en el tiempo la simulación de sistemas y como técnica de simulación, la Dinámica de Sistemas (DS). Esta técnica permite determinar la dinámica de los Flujos de Materiales en el tiempo, identificando patrones de consumo y estimando la demanda futura de estos materiales.

Es decir, con el modelo de simulación, se logró simular el comportamiento de los flujos de materiales de construcción de vivienda en el tiempo. En particular, se realizó estimaciones para el período 2013-2062, como una forma de conocer el comportamiento del consumo de materiales de construcción de viviendas en largo plazo, caracterizar las relaciones entre variables y parámetros, identificar ciclos, retardos y patrones de comportamiento en la actividad edificadora.

De modo que, la simulación del caso base, muestra que bajo las condiciones actuales, el consumo de materiales de construcción aumentará para las próximas cuatro décadas en 1670 millones de toneladas con respecto a 2013, de estos materiales el 30% corresponden a Agregados Triturados el 29.7%; Arena de Río, el 15%; Cerámica cocida el 12%; roca muerta y el 11.8% a Cemento Gris. Adicionalmente, se generarán 1282 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición en el mismo período.

De estos residuos, entre el 80% y el 90%, pueden ser recuperados y usados como sustitutos de materiales extraídos de canteras, los cuales representan cerca del 80% del peso de una obra; lo cual, además de generar un beneficio ambiental, generan un beneficio económico puesto que las plantas de reciclaje y recuperación de residuos de construcción y demolición se pueden ubicar cerca de las obras de construcción. La tendencia en Colombia, es que las canteras de donde se extraen estos materiales, cada día se sitúan más lejos de las obras de construcción dados los problemas ambientales que representan, con lo cual el costo de los materiales nuevos extraídos de canteras tiende a aumentar de forma considerable para los próximos años, esto puede afectar

directamente el costo de construcción de las viviendas y el precio de venta, desmotivando la demanda.

Ahora bien, los datos usados para la elaboración del modelo se obtuvieron a partir de las bases de datos de entidades nacionales como el DANE y CAMACOL; sin embargo, estas bases de datos sólo poseen información sobre el comportamiento del sector constructor en general, no existe información pública disponible sobre el mercado de materiales de construcción en Colombia. Por lo tanto, los flujos de materiales son calculados teniendo en cuenta el mercado de viviendas y la intensidad en el uso de materiales de construcción según las técnicas de construcción de viviendas usadas en Colombia. No tener acceso a información sobre el mercado de materiales de construcción limita la investigación realizada, sacrificando la precisión de los pronósticos del modelo, puesto los cálculos de los flujos de materiales se realizan de forma indirecta.

Es importante aclarar que la investigación realizada no tenía acumular inventarios de minerales, sino entender el comportamiento de la demanda dado que hay restricciones en la oferta y restricciones ambientales, y aun cuando estas restricciones existen va a seguir habiendo oferta. Sin embargo, los materiales serán traídos de otra parte, lo cual implica costos altos. Para poder proponer soluciones al desabastecimiento hay que entender como es la demanda. En la tesis solo se aborda el tema del desabastecimiento desde la demanda (Castaño & Otros, 2013).

Dada la importancia del sector de la construcción para el desarrollo económico del país, y la alta dependencia de este sector de materiales no renovables que son extraídos de minas y canteras como los Agregados Triturados y la Arena, Colombia debe implementar políticas orientadas al uso más eficiente e intensivo de los materiales de construcción, como una forma de garantizar la sostenibilidad del sector y el suministro de materiales a costos razonables en el tiempo.

Finalmente, algunos de los temas sin abordar a profundidad en este estudio y que pueden ser la base para investigaciones posteriores son: el estudio de los efectos del reciclaje de residuos de la construcción y demolición en la reducción de la contaminación generada por el sector y en la eficiencia en el uso de los materiales. De modo que, el estudio de los efectos de la redensificación en la reducción de problemas sociales, asociados al deterioro de los barrios y/o sectores y en el agotamiento del suelo urbanizable de las ciudades.

Referencias

- Hinterberger, F., Giljum, S., & Hamme, M. (2003). *Material Flow Accounting and Analysis (MFA), A Valuable Tool for Analyses of Society-Nature Interrelationships*. Entry prepared for the Internet Encyclopedia of Ecological Economics., Sustainable Europe Research Institute (SERI).
- Aguiló, M., & Fernández, J. A. (1974). *Prefabricación: teoría y práctica*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.
- Ayres, R. (1989). *Industrial Metabolism in Technology and Environment*. Washington: National Ac

- Hinterberger, F., Giljum, S., & Hamme, M. (2003). *Material Flow Accounting and Analysis (MFA), A Valuable Tool for Analyses of Society-Nature Interrelationships*. Entry prepared for the Internet Encyclopedia of Ecological Economics., Sustainable Europe Research Institute (SERI).
- Mendoza, J.-M., Oliver-Solà, J., Gabarrell, X., Josa, A., & Rieradevall, J. (2012). *Life cycle assessment of granite application in sidewalks*. Institute of Environmental Science and Technology (ICTA), School of Engineering (EE), Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Barcelona. Obtenido de <http://link.springer.com/article/10.1007/s11367-012-0391-1>
- Aguiló, M., & Fernández, J. A. (1974). *Prefabricación: teoría y práctica*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.
- Alfonso, W., & Pardo, C. I. (Julio de 2014). Urban material flow analysis: An approach for Bogotá, Colombia. *Ecological Indicators*, 42, 32-42. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.10.035>.
- Arqhys. (16 de agosto de 2014). *Arqhys Arquitectura*. Obtenido de <http://www.arqhys.com/>
- ASTM. (1988). American Society for Testing and Materials. *Annual Book of ASTM Standards*.
- Ayres, R. (1989). *Industrial Metabolism in Technology and Environment*. Washington: National Academy Press.
- Banco Mundial. (14 de Agosto de 2014). *Banco Mundial, BM*. Obtenido de <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS/countries>
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System dynamics review*, 3(12), 183-210.
- Bergsdal, H. (2007). Dynamic material flow analysis for Norway's dwelling stock. *Building Research & Information* 35(5), 557 – 570.
- Billy, R. (2012). *Material Flow Analysis of Extruded Aluminium in French Buildings: Opportunities and Challenges for the Implementation of a Window-to-Window System in France*. Norwegian University of Science and Technology. Norway: Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Master in Industrial Ecology. Recuperado el 23 de mayo de 2013, de <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:no:ntnu:diva-19013>.
- Blanco, F. (2013). *Notas: laboratorio de cementos*. Oviedo, España: Escuela de Minas, Universidad de Oviedo.
- CAMACOL. (Septiembre de 2010). ESCASEZ DE SUELO Y PRECIOS DE LA VIVIENDA EN COLOMBIA. *Estudio Económicos*, 24. Obtenido de http://camacol.co/sites/default/files/secciones_internas/EE_Coy20100924073402.pdf
- Cámara Colombiana de la Construcción, C. (2008). *El sector de la construcción en Colombia: hechos estilizados y principales determinantes del nivel de actividad*. CAMACOL, Departamento de Estudios Económicos. Recuperado el 12 de junio de 2013, de http://camacol.co/sites/default/files/secciones_internas/EE_Inv20081119101141_0.pdf
- Caputto, I., Silva, D., & Herrera, P. (2000). *Las Edades De Un Edificio, XIX Congreso Panamericano De Valuación*. Esparta, Venezuela.

- Cárdenas, M., & Bernal, R. (1997). *Auge y Crisis de la Construcción en Colombia: Causas y Consecuencias*. Revista Camacol, V.21, N.1.
- Cárdenas, M., & Chaparro, E. (2004). *Industria Minera de los materiales de construcción*. Naciones Unidas, CEPAL, Santiago de Chile. Recuperado el 22 de mayo de 2013, de <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/9/19839/lcl2186.pdf>
- Cárdenas, M., & Hernández, M. (2006). *El sector financiero y la vivienda*. Bogotá: Fedesarrollo. Obtenido de <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/El-Sector-Financiero-y-la-Vivienda-M.-C%C3%A1rdenas-y-M.-Hern%C3%A1ndez-2006.pdf>
- Cárdenas, M., Cadena, X., & Quintero, J. (2004). *Determinantes de la Actividad Constructora en Colombia*. Fedesarrollo.
- Carrillo, G. (enero de 2009). Una revisión de los principios de la ecología industrial. *Argumentos*, 22(59). Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952009000100009
- Castaño, B. E. (2011). Tecnología de la Construcción. 203-226. (A. E. Escuela de Ciencias Administrativas, Ed.) Bogotá D.C, Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.
- Castaño, J., Lasso, L., Rodríguez, M., Gómez Cabrera, A., & Ocampo, M. (2013). *Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Clavijo, S., & Salcedo, M. P. (10 de mayo de 2012). *ANIF*. Recuperado el 20 de mayo de 2013, de http://anif.co/sites/default/files/uploads/May10-12_0.pdf
- Clavijo, S., Janna, M., & Muñoz, S. (2004). *La vivienda en Colombia: determinantes socio-económicos y financieros*. Banco de la República de Colombia. Borradores de Economía No. 300.
- Colombia., M. d. (2009). Decreto 1143 de 2009. Obtenido de <http://www.mij.gov.co/normas/2009/d11432009.htm> Decreto 1143 DE 2009
- Cristiano, D., Grajales, A., & Ramos, M. (2011). *Clasificación de la economía Colombiana entre actividades transables y no transables*. Banco de la República de Colombia. Bogotá, D.C.: Borradores de Economía No. 675.
- DANE. (Febrero de 2008). *Ficha Metodológica Déficit de Vivienda*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Obtenido de www.dane.gov.co
- DANE. (13 de Agosto de 2014). *Vivienda VIS y no VIS Ficha Metodológica*. Obtenido de Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/construccion/ficha_vis_no_vis.pdf
- DANE, D. A. (2009). *Metodología Déficit de Vivienda*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2013, de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/Deficit_vivienda.pdf
- Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural*. London: Murray.
- Decreto 2060 (24 de Junio de 2004). Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=14128>

- Díaz, C. A., & Ramírez, J. A. (2011). *Los materiales en la construcción de vivienda de interés social*. Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, D.C: Aincol (Textos).
- Díaz, J., Gaitán, G., Piraquive, M., & Ramírez, P. (1993). *Dinámica de la construcción entre 1950 y 1991*. Planeación y Desarrollo, V. 24.
- EDU. (17 de mayo de 2014). *Plan Parcial de Naranjal*. Obtenido de <http://www.edu.gov.co/index.php/proyectos/planes-parciales-renovacion-urbana/plan-parcial-de-renovacion-urbana-naranjal-y-arrabal.html>
- EDU, E. (2013). *Plan Parcial de Renovación Urbana Naranjal y Arrabal*. Medellín. Obtenido de <http://www.edu.gov.co/index.php/proyectos/planes-parciales-renovacion-urbana/plan-parcial-de-renovacion-urbana-naranjal-y-arrabal.html>
- Escobar, A., & Martínez, H. (2014). *El Sector Minero Colombiano Actual*. Bogotá: UPME.
- Fedesarrollo. (Abril de 2013). El mercado de vivienda en Colombia; problemas de oferta y respuesta de política. *Tendencia económica*(130), 9-13.
- Gleeson, M. (1985). Estimating housing mortality from loss records. *Environment and Planning A*, 17, 647-659.
- González, R. (Septiembre de 2005). Vida útil ponderada de edificaciones. *Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica. Escuela de Ciencias Exactas y Naturales*. San Jose, Costa Rica.
- Herrera, S. (1988). *Notas sobre Algunos Aspectos del Mercado de las Edificaciones en Colombia*. Revista Camacol, N. 41.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor: U Michigan Press.
- Hu, M. (2010). *Dynamic material flow analysis to support sustainable built environment development, with case studies on Chinese housing stock dynamics*. Leiden University, Department of Industrial Ecology. The Netherlands: Institute of Environmental Sciences (CML), Faculty of Science. Recuperado el 23 de abril de 2013, de <http://hdl.handle.net/1887/15545>.
- Hurtado , J., Ruiz-Tagle, M., Cuevas, C., & Chamorro, C. (2011). *Macroeconomía y construcción*. Santiago de Chile: Cámara Chilena de la construcción. Recuperado el 23 de junio de 2013, de <http://www.cchc.cl/wp-content/uploads/2011/09/MACH-33.pdf>
- Johnstone, I. (1 de January de 2001). Energy and mass flows of housing: a model and example. *Building and Environment*, 36, 27-41.
- Junguito, R., López, E., Misas, M., & Sarmiento, E. (1995). *La edificación y la política macroeconómica*. Banco de la República de Colombia. Borradores de Economía No. 41.
- Karnon, J., & Vanni, T. (Enero de 2011). Calibrating Models in Economic Evaluation. *Pharmaco Economics*, 29(1), 51-62.
- Komatsu, Y., Kato, Y., Yoshida, T., & Yashiro, T. (1992). Report of an Investigation of the Life Time Distribution of Japanese Houses in 1987. *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering, Architectural Institute of Japan*, 439, 101-110.

- Minhacienda. (17 de abril de 2009). Ministerio de Hacienda y Crédito Público. *Resolución 954*. Colombia.
- Minhacienda. (26 de junio de 2009). Ministerio de Hacienda y Crédito Público. *Resolución 1707*. República de Colombia.
- Minhacienda. (12 de noviembre de 2009). Ministerio de Hacienda y Crédito Público. *Resolución 3177*. República de Colombia.
- Minhacienda. (22 de abril de 2010). Ministerio de Hacienda y Crédito Público. *Resolución 1139*. República de Colombia.
- MinVivienda. (2004). *Información práctica para formulación de Planes de Ordenamiento Territorial*. Bogotá.
- MINVIVIENDA. (2014). *Colombia: Cien años de políticas habitacionales*. Bogotá: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Recuperado el 19 de junio de 2014, de www.minvivienda.gov.co/Documents/100anosdepoliticashabitacionales.pdf
- Minvivienda. (13 de Agosto de 2014). *Ministerio de Vivienda de la República de Colombia*. Obtenido de <http://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/noticias/2014/abril/d%C3%A9ficit-habitacional-en-colombia-cay%C3%B3-46-3-gracias-a-los-programas-de-vivienda-que-adelanta-el-gobierno-nacional>
- MinVivienda, M. (2012). *Macroproyecto Ciudad Verde*. Bogotá.
- Moeller, A., Prox, M., Schmidt, M., & Lambrecht, H. (2009). Simulation and optimization of material and energy flow systems. *Winter simulation conference*. Germany.
- Müller, D. (2006). Stock dynamics for forecasting material flows - Case study for housing in The Netherlands. *Ecological Economics*, 59, 142-156.
- Müller, D. B., Cao, J., Kongar, E., Altonji, M., Weiner, P. H., & Graedel, A. T. (2007). *Service Lifetimes of Mineral End Uses*. U.S. Geological Survey, Minerals Resources External Research Program.
- OECD. (2008). *MEASURING MATERIAL FLOWS AND RESOURCE PRODUCTIVITY*. Obtenido de <http://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/MFA-Guide.pdf>
- Oliva, R. (23 de Diciembre de 2003). Model calibration as a testing strategy for system dynamics models. *European Journal of Operational Research*, 151(3), 552-568. doi:10.1016/S0377-2217(02)00622-7
- ONU-HABITAD. (2006). *El sector de la construcción, los ciclos económicos y la financiación*. Colombia: ONU-HABITAD, Colombia. Recuperado el 19 de Mayo de 2013, de http://www.onuhabitat.org/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=194&Itemid=81
- Ott, D. (2006). Oferta y Demanda de Recursos Minerales Secundarios en Medellín, Colombia. Un modelo dinámico. *ETH Zúrich, Tesis de grado en Ingeniería Ambiental*. Zúrich.
- Park, J.-a., Hong, S.-j., Kim, I., & Lee, J.-y. (2010). Dynamic material flow analysis of steel resources in Korea. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Pose, M. G. (2000). *Introducción a los Algoritmos Genéticos*. La Coruña: Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones Universidad de la Coruña .

- Rúa, C. C. (2014). Construcción de la matriz energética nacional a partir de la dinámica de sustitución entre fuentes de energía. (U. N. Medellín., Ed.) Medellín, Antioquia, Colombia: Maestría thesis.
- Salazar, A. (2013). *Determinación de las propiedades físicas y, estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional...* Unidad de Planeación Minero Energética UPME-Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, Valle del Cauca. Cali: Ecoingeniería.
- Sartori, I., Bergsdal, H., Müller, D., & Brattebø, H. (2008). Towards modelling of construction, renovation and demolition activities: Norway's dwelling stock, 1900–2100. *Building Research & Information*, 36.
- SDHT. (2011). *CICLO DE PRODUCCIÓN DE VIVIENDA, del CONVENIO DE ASOCIACIÓN No. 082 DE 2011 CELEBRADO ENTRE LA SECRETARÍA DISTRITAL DEL HÁBITAT, SDHT, Y EL CENTRO DE ESTUDIOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y EL DESARROLLO URBANO Y REGIONAL, CENAC*. Bogotá: SECRETARÍA DISTRITAL DEL HÁBITAT. Obtenido de http://www.habitatbogota.gov.co/sdht/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=468&Itemid=76
- Secretaría Distrital del Hábitat. (2011). *Ciclo de producción de vivienda*. Bogotá.
- SINC, I. c. (20 de mayo de 2014). *Ingeniería y tecnología del medio ambiente, Tecnología de materiales*. Obtenido de <http://www.agenciasinc.es/Noticias/Un-buen-diseno-de-las-aceras-puede-reducir-en-mas-de-un-60-el-impacto-ambiental>
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics*. New York: McGraw Hill.
- Vallejo, M., Pérez, M., & Martínez-Alier, J. (2011). Metabolic profile of the Colombian Economy from 1970 to 2007. *Journal of Industrial Ecology*, 245-267.
- Villar, L., & Ramírez, J. M. (2013). *Tendencia Económica No. 130, Abril de 2013*. FEDESARROLLO. Bogotá, D.C.: Tendencia económica. Recuperado el 28 de mayo de 2013, de <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2012/02/T.E.-No.-130.pdf>
- Villar, L., & Ramírez, J. M. (2013). *Tendencia económica N° 130. Fedesarrollo. Abril de 2013*. Bogotá, D.C.: Fedesarrollo. Recuperado el 23 de mayo de 2013, de <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2012/02/T.E.-No.-130.pdf>
- West, J., & Schandl, H. (Octubre de 2013). Material use and material efficiency in Latin America and the Caribbean. *Ecological Economics*, 94, 19-27. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.06.015>
- Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, 213 – 179. ademy Press.
- Banco Mundial. (2014, Agosto 14). *Banco Mundial, BM*. Retrieved from <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS/countries>
- Bergsdal, H. (2007). Dynamic material flow analysis for Norway's dwelling stock. *Building Research & Information* 35(5), 557 – 570.
- Billy, R. (2012). *Material Flow Analysis of Extruded Aluminium in French Buildings: Opportunities and Challenges for the Implementation of a Window-to-Window System*

in France. Norwegian University of Science and Technology. Norway: Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Master in Industrial Ecology. Retrieved mayo 23, 2013, from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:no:ntnu:diva-19013>.

- Blanco, F. (2013). *Notas: laboratorio de cementos*. Oviedo, España: Escuela de Minas, Universidad de Oviedo.
- Cámara Colombiana de la Construcción, C. (2008). *El sector de la construcción en Colombia: hechos estilizados y principales determinantes del nivel de actividad*. CAMACOL, Departamento de Estudios Económicos. Retrieved junio 12, 2013, from http://camacol.co/sites/default/files/secciones_internas/EE_Inv20081119101141_0.pdf
- Cárdenas, M., & Bernal, R. (1997). *Auge y Crisis de la Construcción en Colombia: Causas y Consecuencias*. Revista Camacol, V.21, N.1.
- Cárdenas, M., & Chaparro, E. (2004). *Industria Minera de los materiales de construcción*. Naciones Unidas, CEPAL, Santiago de Chile. Retrieved mayo 22, 2013, from <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/9/19839/lcl2186.pdf>
- Cárdenas, M., & Hernández, M. (2006). *El sector financiero y la vivienda*. Bogotá: Fedesarrollo. Obtenido de <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/El-Sector-Financiero-y-la-Vivienda-M.-C%C3%A1rdenas-y-M.-Hern%C3%A1ndez-2006.pdf>
- Cárdenas, M., Cadena, X., & Quintero, J. (2004). *Determinantes de la Actividad Constructora en Colombia*. Fedesarrollo.
- Carrillo, G. (enero de 2009). Una revisión de los principios de la ecología industrial. *Argumentos*, 22(59). Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952009000100009
- Castaño, B. E. (2011). Tecnología de la Construcción. 203-226. Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Bogotá D.C, Colombia.
- Clavijo, S., & Salcedo, M. P. (2012, mayo 10). *ANIF*. Retrieved mayo 20, 2013, from http://anif.co/sites/default/files/uploads/May10-12_0.pdf
- Clavijo, S., Janna, M., & Muñoz, S. (2004). *La vivienda en Colombia: determinantes socio-económicos y financieros*. Banco de la República de Colombia. Borradores de Economía No. 300.
- Colombia., M. d. (2009). Decreto 1143 de 2009. Retrieved from <http://www.mij.gov.co/normas/2009/d11432009.htm> Decreto 1143 DE 2009
- Cristiano, D., Grajales, A., & Ramos, M. (2011). *Clasificación de la economía Colombiana entre actividades transables y no transables*. Banco de la República de Colombia. Bogotá, D.C.: Borradores de Economía No. 675.
- DANE. (2008, Febrero). *Ficha Metodológica Déficit de Vivienda*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Retrieved from www.dane.gov.co
- DANE. (2014, Agosto 13). *Vivienda VIS y no VIS Ficha Metodológica*. Retrieved from Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/construccion/ficha_vis_no_vis.pdf

- DANE, D. A. (2009). *Metodología Déficit de Vivienda*. Retrieved Septiembre 16, 2013, from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/Deficit_vivienda.pdf
- Diaz, C. A., & Ramirez, J. A. (2011). *Los materiales en la construcción de vivienda de interés social*. Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, D.C: Aincol (Textos).
- Díaz, J., Gaitán, G., Piraquive, M., & Ramírez, P. (1993). *Dinámica de la construcción entre 1950 y 1991*. Planeación y Desarrollo, V. 24.
- Fedesarrollo. (2013 , Abril). El mercado de vivienda en Colombia; problemas de oferta y respuesta de política. *Tendencia económica*(130), 9-13.
- Gleeson, M. (1985). Estimating housing mortality from loss records. *Environment and Planning A*, 17, 647-659.
- Herrera, S. (1988). *Notas sobre Algunos Aspectos del Mercado de las Edificaciones en Colombia*. Revista Camacol, N. 41.
- Hu, M. (2010). *Dynamic material flow analysis to support sustainable built environment development, with case studies on Chinese housing stock dynamics*. Leiden University, Department of Industrial Ecology. The Netherlands: Institute of Environmental Sciences (CML), Faculty of Science. Retrieved abril 23, 2013, from <http://hdl.handle.net/1887/15545>.
- Hurtado , J., Ruiz-Tagle, M., Cuevas, C., & Chamorro, C. (2011). *Macroeconomía y construcción*. Santiago de Chile: Cámara Chilena de la construcción. Retrieved junio 23, 2013, from <http://www.cchc.cl/wp-content/uploads/2011/09/MACH-33.pdf>
- Junguito, R., López, E., Misas, M., & Sarmiento, E. (1995). *La edificación y la política macroeconómica*. Banco de la República de Colombia. Borradores de Economía No. 41.
- Komatsu, Y., Kato, Y., Yoshida, T., & Yashiro, T. (1992). Report of an Investigation of the Life Time Distribution of Japanese Houses in 1987. *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering, Architectural Institute of Japan*, 439, 101-110.
- Minhacienda. (2009, abril 17). Ministerio de Hacienda y Crédito Público. *Resolución 954*. Colombia.
- Minhacienda. (2009, junio 26). Ministerio de Hacienda y Crédito Público. *Resolución 1707*. República de Colombia.
- Minhacienda. (2009, noviembre 12). Ministerio de Hacienda y Crédito Público. *Resolución 3177*. República de Colombia.
- Minhacienda. (2010, abril 22). Ministerio de Hacienda y Crédito Público. *Resolución 1139*. República de Colombia.
- Minvivienda. (2014, Agosto 13). *Ministerio de Vivienda de la República de Colombia*. Retrieved from <http://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/noticias/2014/abril/d%C3%A9ficit-habitacional-en-colombia-cay%C3%B3-3-gracias-a-los-programas-de-vivienda-que-adelanta-el-gobierno-nacional>
- Moeller, A., Prox, M., Schmidt, M., & Lambrecht, H. (2009). Simulation and optimization of material and energy flow systems. *Winter simulation conference*. Germany.

- Müller, D. (2006). Stock dynamics for forecasting material flows - Case study for housing in The Netherlands. *Ecological Economics*, 59, 142-156.
- Müller, D. B., Cao, J., Kongar, E., Altonji, M., Weiner, P. H., & Graedel, A. T. (2007). *Service Lifetimes of Mineral End Uses*. U.S. Geological Survey, Minerals Resources External Research Program.
- ONU-HABITAD. (2006). *El sector de la construcción, los ciclos económicos y la financiación*. Colombia: ONU-HABITAD, Colombia. Retrieved Mayo 19, 2013, from http://www.onuhabitat.org/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=194&Itemid=81
- Park, J.-a., Hong, S.-j., Kim, I., & Lee, J.-y. (2010). Dynamic material flow analysis of steel resources in Korea. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Salazar, A. (2013). *Determinación de las propiedades físicas y, estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional...* Unidad de Planeación Minero Energética UPME-Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, Valle del Cauca. Cali: Ecoingeniería.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics*. New York: McGraw Hill.
- Villar, L., & Ramírez, J. M. (2013). *Tendencia Económica No. 130, Abril de 2013*. FEDESARROLLO. Bogotá, D.C.: Tendencia económica. Retrieved mayo 28, 2013, from <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2012/02/T.E.-No.-130.pdf>
- Villar, L., & Ramírez, J. M. (2013). *Tendencia económica N° 130. Fedesarrollo. Abril de 2013*. Bogotá, D.C.: Fedesarrollo. Retrieved mayo 23, 2013, from <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2012/02/T.E.-No.-130.pdf>
- Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, 213 – 179.
- Calvo, N., Varela-Candamio, L., & Novo-Corti, I. (2014). A Dynamic Model for Construction and Demolition (C&D) Waste Management in Spain: driving policies based on economic incentives and tax penalties. *Sustainability*, 6(1), 416-435.
- Construction Material Recycling Association (2005), Construction Material Recycling Association, Chicago, IL. URL: <http://www.cdrecycling.org/>.

Anexo A: soporte de las pruebas de validación del modelo

En este capítulo, se presentan los soportes de las pruebas de validación del modelo de simulación descritas en la sección 9.1. Estas pruebas son; pruebas de valoración directas a la estructura (consistencia dimensional y confirmación de parámetros y variables exógenas) y de estructura orientadas al comportamiento (límites del modelo, condiciones extremas, error de integración y análisis de sensibilidad).

I. CONFIRMACIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES EXÓGENAS

En la Tabla 19, se presentan los parámetros del modelo con su respectivo valor y fuente de información de la que se extrajo. De igual forma, para la construcción del modelo se usaron algunas variables exógenas, las cuales se muestran en la Tabla 20, junto con las

fuentes de las cuales se obtuvieron los valores. Finalmente, en la Tabla 21, se observan los valores de las variables exógenas en el periodo histórico simulado (1998 – 2014).

Tabla 19: Parámetros del modelo

Nombre	Valor	Fuente
Hogares_por_vivienda	1.04<<hogar/vivienda>>	DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 2014. Encuesta de calidad de vida (ECV).
Intensidad_estimada_materiales_and	{1180.416667,950.4166667,308.75,60.41666667 }	(Salazar, 2013)
Intensidad_materiales_vías	{1237.5,1007.5,137.5,117.5 }	(Salazar, 2013)
Intensidad_MC	{624.99,733.63,306.12,372.52,358.08,9.44,0.13,0,2.39,0,0,0}	(Salazar, 2013)
Intensidad_ME	{404.05,349.09,138.78,152.24,301.28,20.31,3.58,5.92,2.06,0.13,0.48,0.55}	(Salazar, 2013)
Intensidad_SI	{542.19,445.21,156.74,46.6,39.98,26.68,5.02,3.15,2.35,0.42,0.37,0.32}	(Salazar, 2013)
Participación_MC	35.7<<%>>	Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 2014. Estadísticas de Licencias de Construcción.
Participación_ME	39.3<<%>>	DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 2014. Estadísticas de Licencias de Construcción.
Participación_SI	25<<%>>	DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 2014. Estadísticas de Licencias de Construcción.
Personas_por_hogar	3.5 <<Persona/hogar>>	DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 2014. Encuesta de calidad de vida (ECV).
Período_finalización_viviendas	0.75<<yr>>	(Secretaría Distrital del Hábitat, 2011)
Porcentaje_and	20%	(MinVivienda, 2012)

Nombre	Valor	Fuente
Porcentaje_vías	80%	(MinVivienda, 2012)
Tasa_otros_usos	0.13<<1/yr>>	(EDU E. , 2013)
Tasa_reciclaje_RCD	0.05	(Castaño, Lasso, Rodríguez, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013)
Tasa_redensificación	0.87	(EDU, 2013)
Vida_util_andenes	20<<yr>>	(Mendoza, Oliver-Solà, Gabarrell, Josa, & Rieradevall, 2012)
Vida_util_vías	10<<yr>>	(Mendoza, Oliver-Solà, Gabarrell, Josa, & Rieradevall, 2012)
Vida_ùtil_OU	80	(González, 2005)
Vigencia_POTS	12<<yr>>	(MinVivienda, 2004)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20: Variables exógenas

Variable	Fuente
PIB_per_cápita	(International Monetary Fund, 2014)
Población	(Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2014)
Hogares_por_vivienda	(Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2014)
Área_por_vivienda	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2014)
Personas_por_hogar	(Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2014)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21: Valores de las variables exógenas

Año	Población Personas	Hogares_por_vivienda Hogares/vivienda	Área_por_vivienda m²/vivienda	Personas_por_hogar Personas/hogar	PIB_per_cápita COP 2005
1998	39.184.456	1,03779513	84,59391025	4,262524228	7.367.614
1999	39.730.798	1,033383423	72,52239196	4,217136451	6.968.988
2000	40.295.563	1,02888385	73,02994696	4,174694999	7.069.149
2001	40.813.541	1,024745265	72,52861862	4,127076328	7.095.446
2002	41.328.824	1,021426772	79,53313944	4,080055877	7.181.400
2003	41.848.959	1,019033272	99,89847497	4,034402597	7.370.060
2004	42.368.489	1,017474024	98,60409436	3,989458208	7.667.806
2005	42.888.592	1,016570412	96,11838397	3,945199935	7.931.153
2006	43.405.956	1,015350018	99,15634882	3,904404508	8.361.589
2007	43.926.929	1,014524089	99,69348671	3,861715513	8.832.644
2008	44.451.147	1,013979697	99,31912981	3,81845145	9.038.057
2009	44.978.832	1,013630997	92,08699297	3,77540539	9.079.577
2010	45.509.584	1,013417117	90,11615373	3,732990091	9.329.485
2011	46.044.601	1,013299549	93,02386475	3,694182797	9.832.773
2012	46.581.823	1,013241401	95,05911043	3,656033817	10.126.849
2013	47.121.089	1,01322316	87,13150408	3,618890278	10.434.880
2014	47.661.787	1,0132313	98,43426364	3,655656456	10.775.298

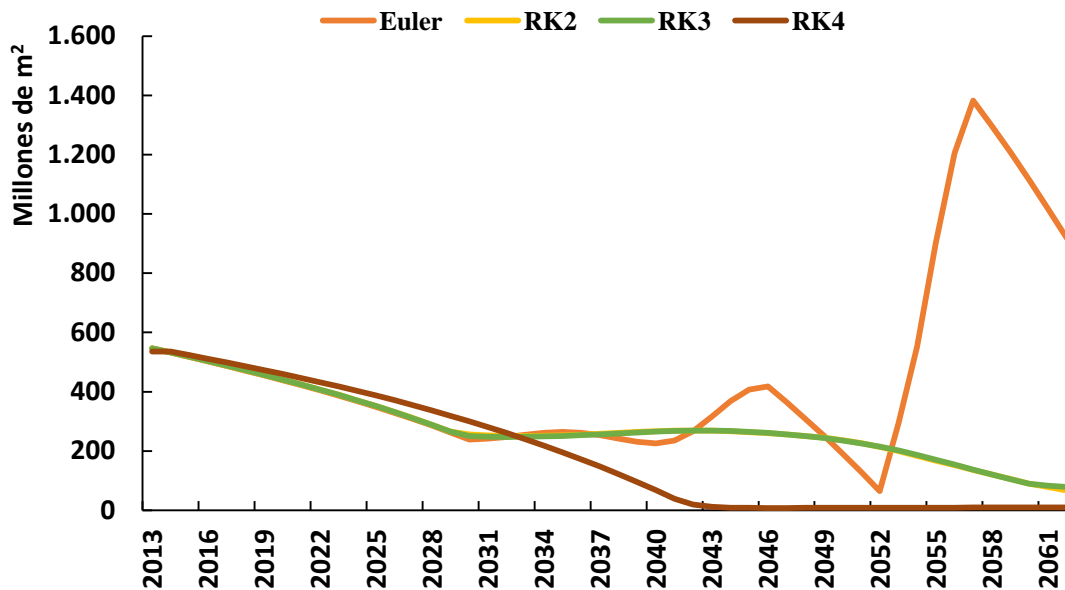
Fuente: Elaboración propia

II. Errores de integración: en el modelo se usa el método de integración Runge-Kutta cuatro (RK4).

Para esta prueba de validación se realizaron cuatro simulaciones, con:

- Paso de tiempo igual a un año y el método de integración “Euler”
- Paso de tiempo igual a un año y método de integración “Runge-Kutta cuatro (RK4) de segundo orden”
- Paso de tiempo igual a un año y método de integración “Runge-Kutta cuatro (RK4) de tercer orden”
- Paso de tiempo igual a un año y método de integración “Runge-Kutta cuatro (RK4) de cuarto orden”

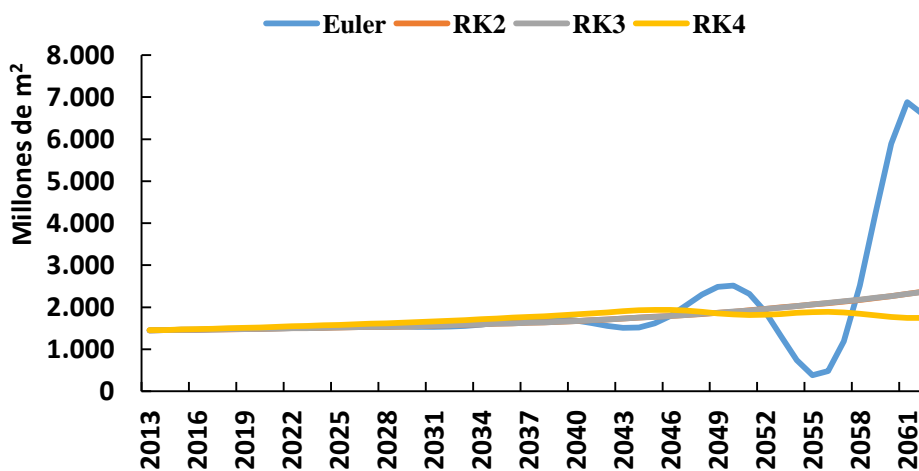
Figura 26: Comportamiento del área disponible, según el método de integración usado.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 26 observamos que, el área disponible para construcción es sensible al método de integración que se use en el modelo de simulación, se evidencian grandes diferencias sobre todo comparando el método de RK 4 con el método de Euler. De igual forma, se observan pequeñas diferencias entre los métodos de RK 4 de segundo y tercer orden (cuyo comportamiento es similar) y el método de RK 4 de cuarto orden.

Figura 27: Comportamiento del área total construida, según el método de integración usado.



Fuente: Elaboración propia

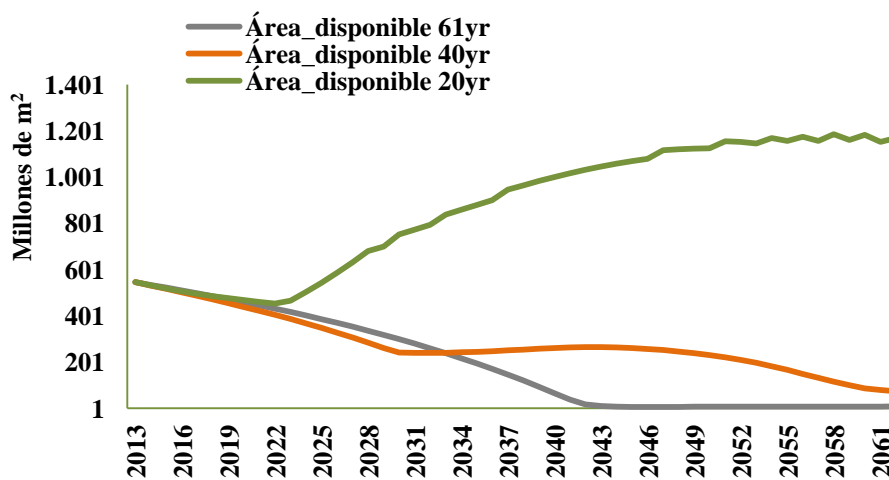
En la Figura 27, se observa que el método de Euler, al igual que en el caso del área disponible, produce resultados muy diferentes para el área total construida a los arrojados usando el método de RK 4, en cualquier orden. Para los métodos RK 4, se presenta una pequeña diferencia, entre RK 4 de orden 2 y 3 (cuyos valores, al igual que

en el caso del área disponible, presentan resultados similares) con respecto a RK 4 de orden 4. Estas diferencias observadas en los métodos de integración, tienen que ver con el grado de precisión que maneja cada uno de los métodos.

III. Análisis de sensibilidad

- **Variaciones en la vida útil promedio de las edificaciones:** se corrió el modelo cambiando la vida útil de las edificaciones de 60 años a; 20 y 40 años respectivamente, los resultados se muestran a continuación.

Figura 28: Área disponible para construcción de vivienda, cuando la vida útil de las viviendas es 61, 40 y 20 años respectivamente.



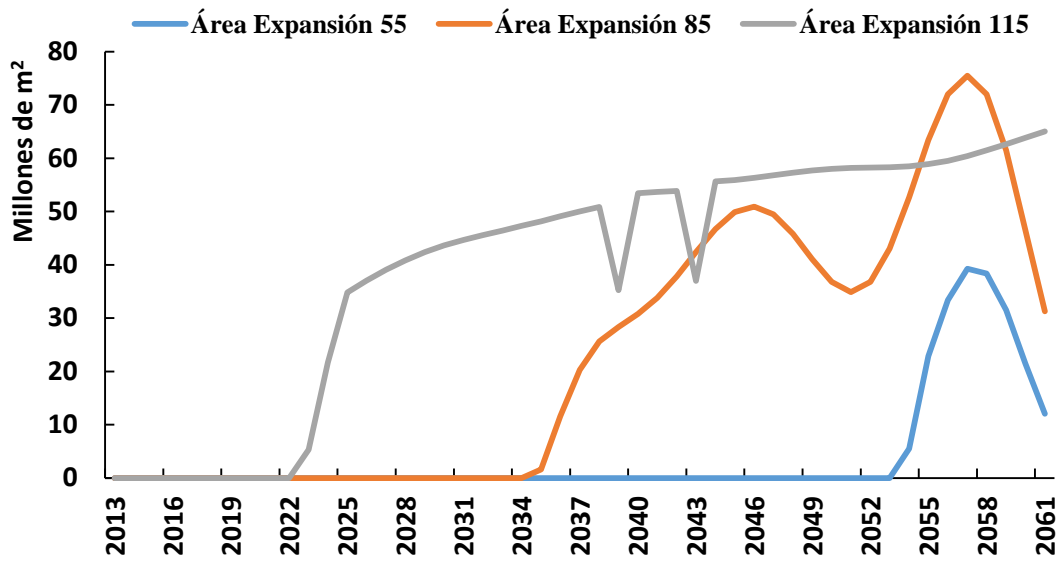
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 28, tenemos que si disminuye la vida útil de las edificaciones se acelera el proceso de demolición liberando área; por lo tanto, el área disponible aumenta. Mientras que si se aumenta la vida útil de las edificaciones, los procesos de demolición se vuelven más lentos, por lo tanto disminuye el área liberada.

Teniendo en cuenta los resultados que se muestran en la Figura 28, tenemos que el modelo es altamente sensible al parámetro “vida útil de las edificaciones”, entre más alto sea este parámetro, más rápido se agota el área disponible para construcción de vivienda, y si el área disponible se agota, la demanda de materiales cae, ya que si no se construyen viviendas, no hay demanda de materiales de construcción en este sector.

- **Variaciones en el área por vivienda:** se corrió el modelo cambiando el área por vivienda, tomando los siguientes valores; 55, 85 y 115 metros cuadrados. Esto con el objetivo de analizar el impacto del área por vivienda (densidad habitacional) en los procesos de expansión urbanos, el déficit de viviendas y la demanda tanto de viviendas como de área para construcción de viviendas.

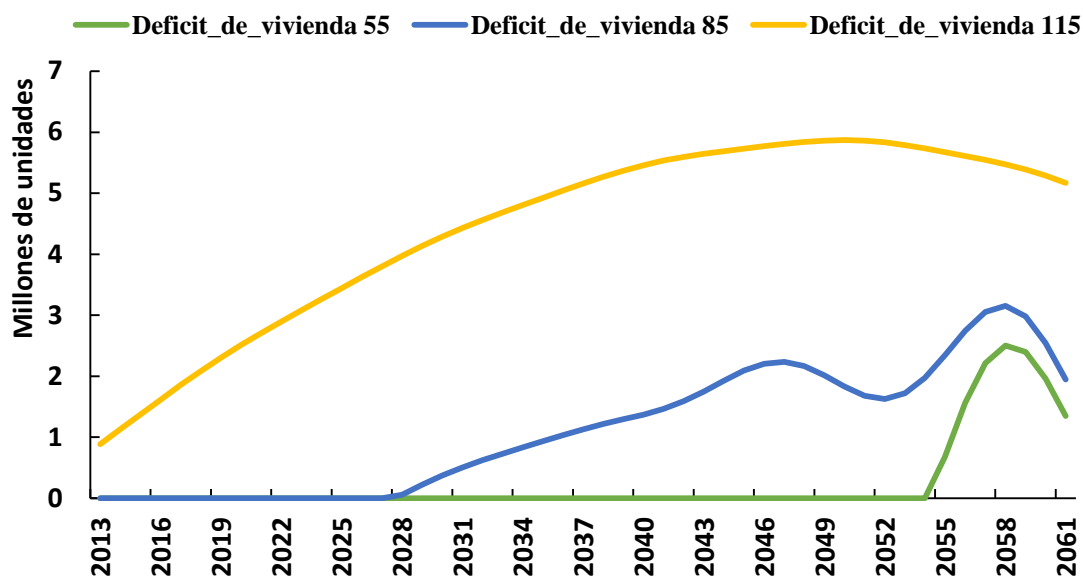
Figura 29: Área en expansión variando el área por vivienda; 55, 85 y 115 metros cuadrados.



Fuente: Elaboración propia

De la Figura 29, tenemos que si se aumenta el área por vivienda, se acelera el proceso de expansión urbana, dado que habrá mayor demanda de nueva área para cubrir la demanda de viviendas. El proceso de expansión es una respuesta a la falta de área disponible para construcción de viviendas, en el caso de un área por vivienda de 115 metros cuadrados; la necesidad de expansión se acelera, producto de que se necesita más área para construir igual cantidad de viviendas que en los demás casos (áreas por vivienda de 85 y 55 metros cuadrados). Cabe resaltar que hay expansión mientras el área disponible sea inferior al área demandada, y si en un período el área disponible es menor que el área demandada, al periodo siguiente se hace la corrección mediante la expansión, aunque este proceso debe responder a una planeación de al menos doce años, que es el tiempo para el cual están en vigencia los planes de ordenamiento territorial que son los que definen la necesidades de área y los proyectos de expansión para ese período.

Figura 30: Déficit de vivienda, variando el área por vivienda; 55, 85 y 115 metros cuadrados.



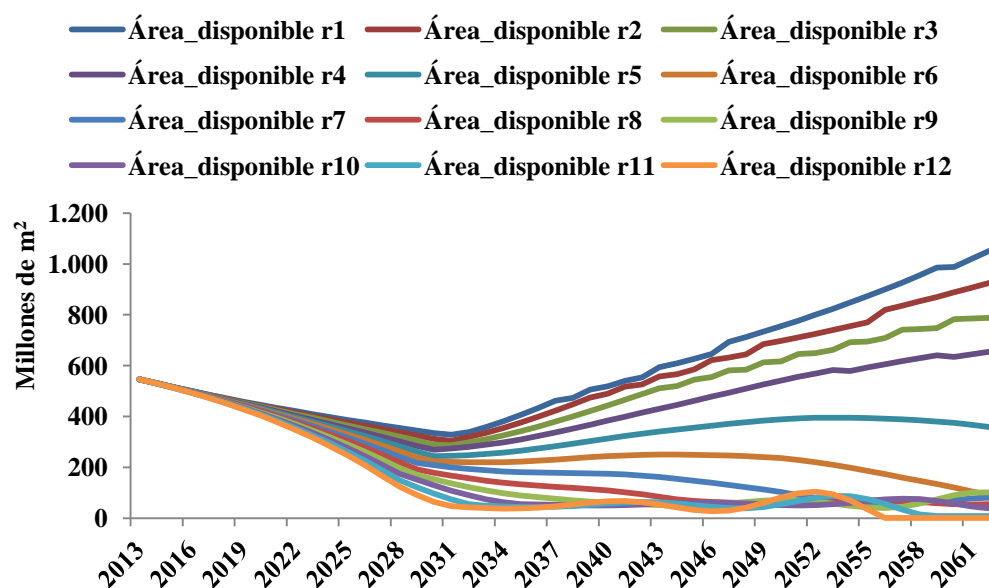
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 30, se muestra que si se aumenta el área por vivienda, aumenta el déficit de viviendas, puesto que el área disponible se agota más rápido, mientras que si se disminuye el área por vivienda, se puede reducir el déficit de vivienda, ya que se pueden construir más vivienda aprovechando al máximo el área disponible. Mientras que si se aumenta el área por vivienda, se aumenta el área requerida para satisfacer la demanda de viviendas, lo cual trae como consecuencia la necesidad de habilitar nuevas áreas para construcción de viviendas mediante el mecanismo de la expansión urbana, este mecanismo se define en los planes de ordenamiento territoriales.

Si se aumenta el área por vivienda aumenta la demanda de viviendas, puesto que la construcción de viviendas disminuye, mientras la demanda sigue aumentando producto de factores como el aumento de la población y la conformación de hogares, y si aumenta la demanda de viviendas, aumenta la demanda de materiales de construcción, esto se evidencia claramente en las Figuras 25, 26 y 27.

- **Variaciones en el comportamiento del PIB per cápita:** tomando como referencia el valor del PIB per cápita para Colombia en el año 2013, que fue de 10.434.880 en COP 2005, según cifras del FMI, se evalúan los siguientes escenarios de crecimiento; cuando el PIB per cápita aumenta un 0,5% cada año (r1), cuando aumenta un 1%(r2), 1,5%(r3), 2%(r4), 2,5%(r5), 3%(r6), 3,5%(r7), 4%(r8), 4,5%(r9), 5%(r10), 5,5%(r11) y finalmente 6%(r12).

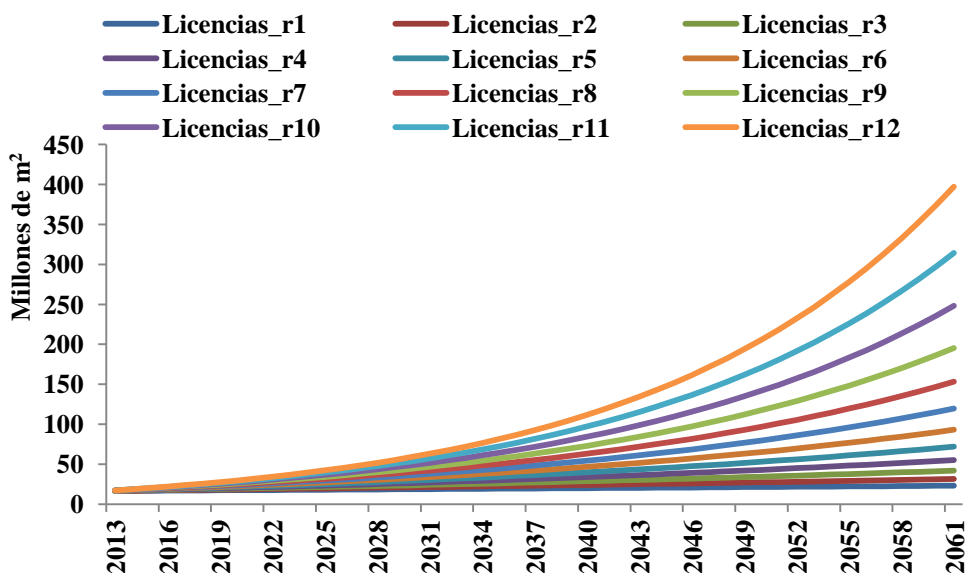
Figura 31: Área disponible cuando el PIB crece con porcentajes entre el 0,5 % y el 6%.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 31, se observa que, cuando el PIB crece por encima del 2,5% anual, el área disponible para construcción de viviendas se agota en el período de simulación, para valores de crecimiento por debajo del 2,5% anual, el área disponible disminuye los primeros 18 años, luego de los cuales, producto de que las demoliciones son mayores a las construcciones, se libera más área de la requerida y por lo tanto el área disponible aumenta.

Figura 32: Licencias aprobadas cuando el PIB crece con porcentajes entre el 0,5 % y el 6%.

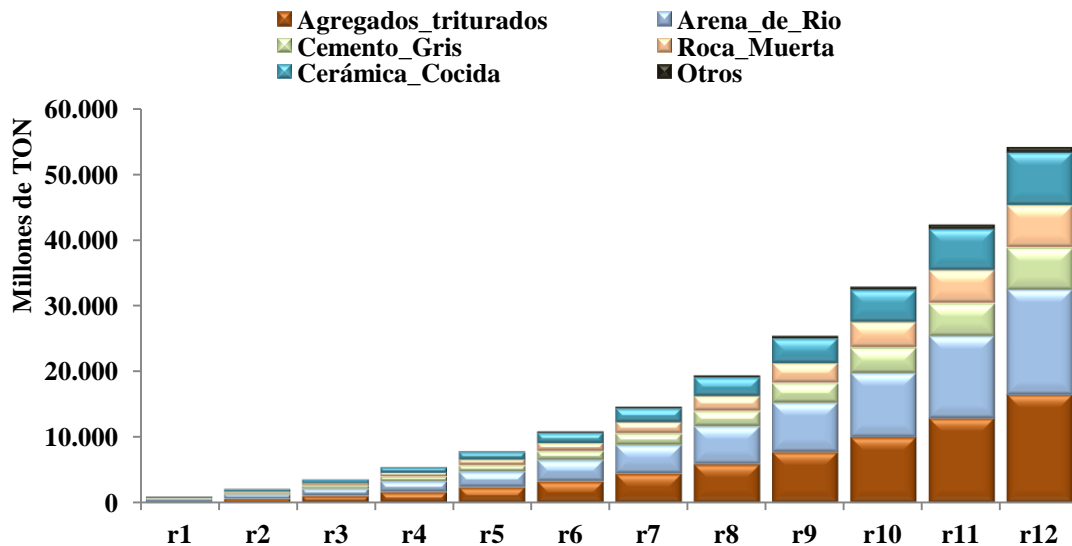


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 32, se observa que si el PIB aumenta, aumentan las licencias aprobadas. Dado que el hecho de que el PIB crezca es una medida de que las condiciones

socioeconómicas del país están mejorando, y si la economía del país mejora, hay mayor calidad de vida en sus habitantes, y por lo tanto, recursos para adquirir viviendas.

Figura 31: Consumo de materiales de construcción cuando el PIB crece con porcentajes entre el 0,5 % y el 6%.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 31, se observa que si el PIB aumenta, aumentan las licencias aprobadas, y si aumentan las licencias aprobadas, aumenta la demanda y consumo de materiales de construcción.

Finalmente tenemos que, el PIB es un gran dinamizador del sector de la construcción, si el PIB aumenta, aumenta la demanda de viviendas, que se mide en las licencias aprobadas, aumenta el área construida y el stock y consumo de materiales.

Anexo B: formulación del modelo de para el caso base en Powersim

Tabla 22: Formulación en PowerSim

Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Área andenes	Nivel	metro ²	Los andenes y vías constituyen el 25% del área total construida. Las vías representan el 75% y los andenes el 25%. El área construida inicial de viviendas corresponde a 1.448.721.825,30544 m ² , por regla de 3 simple se obtiene que el 100% del área construida corresponde a 1.931.629.100,41 m ² .	120.726.818,775<<metros ² >>
Contrucciones_OU	Nivel	metro ²	Construcciones con destino distinto a vivienda. Según el DANE, entre el 10% y el 14% del área licenciada corresponde a construcciones destinadas a otros usos, tales como; industrias, Bodegas, Hoteles, Educación, Hospitales, Edificios para la administración pública, edificios con destino religioso, entre otros.	231.795.492,049<<metros ² >>
Desechos_OU	Nivel	Kilogramo	Desechos de construcción y demolición de las construcciones agrupadas en "otros usos".	
Inventario_Materiales	Nivel	Kilogramo	Materiales de construcción acumulados en las edificaciones.	Inv_inicial_materiales
Materiales_Anden	Nivel	Kilogramo	Materiales de construcción acumulados en los andenes construidos.	Inv_inicial_mat_and
Materiales_demolición	Nivel	Kilogramo	Materiales liberados producto de las demoliciones.	
Materiales_OU	Nivel	Kilogramo	Materiales acumulados en las edificaciones agrupadas en "otros usos".	

Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Materiales_Viv_antiguas	Nivel	Kilogramo	Materiales acumulados en las viviendas que ya alcanzaron su vida útil y que pueden ser objeto de demoliciones.	
materiales_vías	Nivel	Kilogramo	Materiales acumulados en las vías urbanas	Inv_inicial_mat_vías
Residuos	Nivel	Kilogramo	Residuos producto de la demolición de viviendas	
Área_construida	Nivel	metro ²	A 2013, según cálculos propios, teniendo en cuenta las cifras del DANE, teníamos un total de 1.448.721.825,30544 m ² construidos de vivienda en Colombia.	Inventario_inicial_área
Área_demolida	Nivel	metro ²	Área ocupada por las viviendas demolidas.	3.952.440.013<<metros ² >>
Área_disponible	Nivel	metro ²	Según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia (MINVIVIENDA, 2014, pág. 50), en Colombia, a 2013, había 54.665 hectáreas de suelo desarrollable para vivienda, delimitado como suelo de desarrollo y renovación urbana.	546.650.000<<metros ² >>
Área_en_construcción	Nivel	metro ²	Representa el área de las edificaciones que están en proceso de construcción, pero que no han sido terminadas aun. Fuente: Censo edificaciones DANE a diciembre de 2013.	11.164.748<<metros ² >>
Área_viviendas_antiguas	Nivel	metro ²	Área de viviendas que ya cumplieron su vida útil y que pueden ser objeto a demoliciones.	79.048.800,259 <<metros ² >>
Área_vías	Nivel	metro ²	Corresponde al 75% del área destinada para andenes y vías.	362.180.456,326<<metros ² >>

Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Hogares_por_vivienda	Constante	hogar/vivienda	Información disponible en la encuesta de calidad de vida del DANE, publicada con periodicidad anual. En el año 2013, en promedio había 1,04 hogares por vivienda en Colombia.	1.04<<hogares/vivienda>>
Intensidad_estimada_materiales_and	Constante	Kilogramo/metro ²	Cantidad de material requerida para construir un metro cuadrado de andenes	{1180.42;950.42;308.75;60.42 }
Intensidad_materiales_vías	Constante	Kilogramo/metro ²	Cantidad de material requerida para construir un metro cuadrado de vías urbanas	{1237.5;1007.5;137.5;117.5 }
Intensidad_MC	Constante	Kilogramo/metro ²	Cantidad de cada material, en kilogramos, que se requiere para construir un metro ² de edificación bajo el sistema constructivo mampostería confinada.	{624.99;733.63;306.12;372.52;358.08,9.44;0.13;0;2.39;0;0;0}
Intensidad_ME	Constante	Kilogramo/metro ²	Cantidad de cada material, en kilogramos, que se requiere para construir un metro ² de edificación bajo el sistema constructivo mampostería estructural.	{404.05;349.09;138.78;152.24;301.28;20.31;3.58;5.92;2.06;0.13;0.48;0.55}
Intensidad_SI	Constante	Kilogramo/metro ²	Cantidad de cada material, en kilogramos, que se requiere para construir un metro ² de edificación bajo el sistema industrializado.	{542.19;445.21;156.74;46.6;39.98;26.68;5.02;3.15;2.35;0.42;0.37;0.32}
Participación_MC	Constante	%	Del total de las licencias aprobadas para vivienda, el 35,7%% corresponde a licencias para viviendas construidas con el sistema constructivo Mampostería Confinada (DANE, 2014).	35.7<<%>>
Participación_ME	Constante	%	Del total de las licencias aprobadas, el 39,3% corresponde a licencias para viviendas construidas con el sistema constructivo Mampostería Estructural (DANE, 2014).	39.3<<%>>

Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Participación_SI	Constante	%	Del total de las licencias aprobadas, el 25% corresponde a licencias para viviendas construidas con el sistema industrializado (DANE, 2014).	$25 \ll \% \gg$
Personas_por_hogar	Constante	Persona/hogar	3,5 personas/ hogar a 2013, según la Encuesta de Calidad de Vida del DANE.	$3.5 \ll \text{Persona/hogar} \gg$
Período_finalización_viviendas	Constante	yr	En promedio un edificio se demora 9 meses desde que se inicia la obra hasta que se completa su construcción (SDHT, 2011).	$0.75 \ll \text{yr} \gg$
Porcentaje_and	Constante	%	El 25% del área aprobada para construcción de edificaciones se debe destinar a andenes y vías. De ese porcentaje, el 25% corresponde andenes.	25%
Porcentaje_vías	Constante	%	El 25% del área aprobada para construcción de edificaciones se debe destinar a andenes y vías. De ese porcentaje, el 75% corresponde vías.	75%
Tasa_otros_usos	Constante	yr^{-1}	Según cifras del plan parcial de Naranjal en Medellín, el 62% del área total disponible será destinado para construir viviendas, por lo tanto para otros usos será destinado el 38% (EDU, 2014).	$0.13 \ll 1/\text{yr} \gg$
Tasa_reciclaje_RC D	Constante		En Colombia, entre el 5 % y el 10 % de los residuos de construcción y demolición son sometidos a procesos de reciclaje y reutilización (Castaño, Lasso, Rodríguez, Gómez Cabrera, & Ocampo, 2013).	0.05
Tasa_redensificación	Constante		Dato obtenido a partir de información del plan parcial de Naranjal (EDU, 2014).	0.87

Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Vida_util_andenes	Constante	yr	Según un estudio de la Universidad de Barcelona, las aceras de hormigón tienen una vida útil promedio de entre 20 y 45 años. Para nuestro caso de estudio trabajaremos con una vida útil de 20 años, luego de los cuales estas se someten a reparación (SINC, 2014).	20<<yr>>
Vida_util_vías	Constante	yr	La vida útil del pavimento asfáltico se estima entre 25 y 30 años, como período de mantenimiento en base a la opinión de expertos se estima de 10 años (Arqhys, 2014).	10<<yr>>
Vida_útil_OU	Constante	yr	Vida útil de las edificaciones agrupadas como "otros usos"	80
Vigencia_POTS	Constante	yr	Guía Metodológica 1 Información práctica para formulación de PLANES DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL, del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. http://www.minvivienda.gov.co/POTPresentacionesGuias/Gu%C3%ADa%20Formulaci%C3%B3n%20Planes%20Ordenamiento.pdf .	12<<yr>>
Andenes_vias	Auxiliar	metro ² /yr	Porcentaje del área aprobada para construcción de vivienda, que debe ser dedicada a construcción de andenes y vías.	$\text{MIN}((0.25 * \text{Licencias_aprobadas}), (0.25 * \text{Área_disponible} / 1 <<yr>>))$
Deficit_de_vivienda	Auxiliar	vivienda	Viviendas requeridas para que exista una relación de uno a uno entre hogares y viviendas en Colombia.	$\text{MAX}(\text{Viviendas_requeridas} - \text{Viviendas_construidas}, 0 * 1 <<vivienda>>)$

Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Demanda_materiales	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales requeridos por año para la construcción de vivienda, la cantidad de cada material requerido es determinada por las licencias de construcción aprobadas por año y por el sistema constructivo usado.	$(Intensidad_S_MConfinada + Intensidad_S_MEstructural + Intesidad_S_industrializado) / 1 \llbracket yr \rrbracket$
Demo_Mconfinada	Auxiliar	metro ²	Área liberada de construcciones bajo el sistema mampostería confinada. En m ² .	$Participación_MC * (Demoliciones * 1 \llbracket yr \rrbracket)$
Demo_Mestructural	Auxiliar	metro ²	Área liberada de construcciones bajo el sistema mampostería estructural. En m ² .	$Participación_ME * (Demoliciones * 1 \llbracket yr \rrbracket)$
Demo_SIndustrializado	Auxiliar	metro ²	Área liberada de construcciones bajo el sistema industrializado. En m ² .	$Participación_SI * (Demoliciones * 1 \llbracket yr \rrbracket)$
Demoliciones	Auxiliar	metro ² /yr	Área total liberada producto de la demolición de edificaciones, por año.	$\frac{\text{Área_viviendas_antiguas}}{\text{Tiempo_demolición}}$
Demoliciones_OU	Auxiliar	metro ² /yr	Área total liberada producto de la demolición de edificaciones agrupadas en "otros tipos de edificaciones diferentes a vivienda", por año.	$\frac{\text{Construcciones_OU}}{\text{Vida_útil_OU}}$
Déficit_área	Auxiliar	metro ²	Área total requerida para construir las viviendas necesarias para que exista una relación de uno a uno entre el total de hogares y el total de viviendas construidas.	$\text{Deficit_de_vivienda} * \text{Área_por_vivienda}$
Déficit_área_factor	Auxiliar		Si este factor es mayor que 1, indica que el área disponible no es suficiente para construir las viviendas que la población necesita.	$\frac{\text{Déficit_área}}{\text{Área_disponible}}$
Efecto_expansión	Auxiliar		Variable que capta la necesidad de habilitar nuevos terrenos para construcción de vivienda, teniendo en cuenta las necesidades de vivienda de la población.	$\text{IF}(\text{Déficit_área_factor} > 1, \text{Déficit_área_factor} / \text{Vigencia_POTS} * 1 \llbracket yr \rrbracket, 0)$

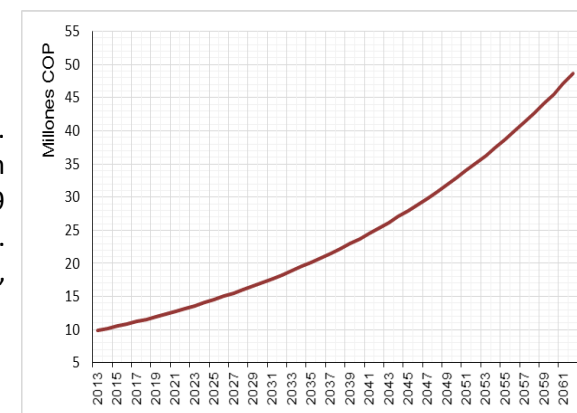
Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Entrada_material es_and	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales requeridos por año, para la construcción de andenes.	'materiales nuevos andenes'+ 'materiales requeridos_mantenimiento'
Entrada_material es_vías	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales requeridos por año, para la construcción de vías urbanas.	Materiales_mantenimiento_vías+Materiales _nuevos_vías
Entrada_área_andenes	Auxiliar	metro ² /yr	Área destinada para la construcción de andenes, por año.	Andenes_vias*Porcentaje_and
Expansión_urban a	Auxiliar	metro ² /yr	Área habilitada por año, para la construcción de viviendas, esta área es definida en los POTS (planes de ordenamiento territorial) de los municipios.	(Déficit_área*Efecto_expansión)/1<<yr>>
Intensidad_MConfinada	Auxiliar	Kilogramo	Materiales que hay acumulados en el periodo inicial, en las edificaciones construidas bajo el sistema mampostería confinada. En kilogramos.	Área_Mconfinada*Intensidad_MC
Intensidad_MEstructural	Auxiliar	Kilogramo	Materiales que hay acumulados en el periodo inicial, en las edificaciones construidas bajo el sistema mampostería estructural. En kilogramos.	Área_Mestructural*Intensidad_ME
Intensidad_S_MCconfinada	Auxiliar	Kilogramo	Materiales requeridos para construcciones elaboradas bajo el sistema constructivo mampostería confinada	Área_ap_Mconfinada*Intensidad_MC
Intensidad_S_MEstructural	Auxiliar	Kilogramo	Materiales requeridos para construcciones elaboradas bajo el sistema constructivo mampostería estructural	Área_ap_MEestructural*Intensidad_ME
Intesidad_industrializado	Auxiliar	Kilogramo	Materiales que hay acumulados en el periodo inicial, en las edificaciones construidas bajo el sistema industrializado. En kilogramos.	Área_SIndustrializado*Intensidad_SI
Intensidad_S_industrializado	Auxiliar	Kilogramo	Materiales requeridos por cada metro cuadrado construido bajo el sistema industrializado.	Área_ap_SIndustrializado*Intensidad_SI
Inv_inicial_mat_a	Auxiliar	Kilogramo	Materiales estimados de los andenes construidos	Intensidad_estimada_materiales_and*93039

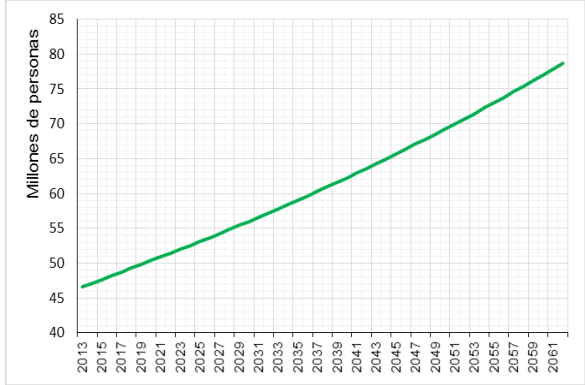
Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
nd			a 2013.	$5.666666667 \llcorner \text{metros}^2 \gg$
Inv_inicial_mat_vías	Auxiliar	Kilogramo	Materiales estimados de las vías urbanas construidas a 2013.	$\text{Intensidad_materiales_vías} * 11164748 \llcorner \text{metros}^2 \gg$
Inventario_inicial_materiales	Auxiliar	Kilogramo	Materiales que hay acumulados en las edificaciones, en el periodo inicial. En kilogramos.	$\text{Intensidad_MConfinada} + \text{Intensidad_MEstructural} + \text{Intensidad_industrializado}$
Inventario_inicial_área	Auxiliar	metro ²	El área total construida inicial, es el resultado de multiplicar el área promedio por vivienda, por el número total de viviendas a 2013 (este valor está disponible en el DANE, en la serie Hogares_viviendas_1985-2020).	$1.369.673.025.046 \llcorner \text{metros}^2 \gg$
Licencias_aprobadas	Auxiliar	metro ² /yr	Se toma como referencia el área total aprobada para vivienda en Colombia para el año 2013, 77 municipios del DANE. En m ² .	$(-7.443.103,173 + (2,296 * \text{PIB_per_cápita} * 1/1 \llcorner \text{Pesos} \gg)) * 1 \llcorner \text{metros}^2/\text{yr} \gg$
Licencias_aprobadas_otros_usos	Auxiliar	metro ² /yr	Según datos del DANE, entre el 10 y el 14% del área licenciada, corresponde a construcciones destinadas a otros usos, tales como; industrias, Bodegas, Hoteles, Educación, Hospitales, Edificios para la administración pública, edificios con destino religioso, entre otros.	$(\text{Licencias_aprobadas} * 0.14) / 0.86$
Material_nuevo	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales nuevos requeridos por año, para construir las viviendas autorizadas mediante las licencias de construcción.	$\text{Demanda_materiales} - \text{Material_recuperado}$
Material_recuperado	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales recuperados producto de las demoliciones que pueden ser usados en la construcción de nuevas viviendas.	$(\text{Materiales_demolición} * \text{Tasa_reciclaje_RCD}) / 1 \llcorner \text{yr} \gg$
Materiales nuevos andenes	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales nuevos requeridos por año, para construir los andenes, según las licencias de construcción de viviendas aprobadas.	$\text{Intensidad_estimada_materiales_and} * \text{entrada_área_andenes}$

Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Materiales requeridos_mantenimiento	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales requeridos por años, para el mantenimiento de los andenes construidos.	$(\text{Area_andenes}'/\text{Vida_util_andenes}) * \text{Intensidad_estimada_materiales_andenes}$
Materiales_liberados	Auxiliar	Kilogramo/yr	MIN (DELAYMTR(Materiales_Viv_antiguas, Retardo_de_molición, 2)/(1<<yr>>), Materiales_Viv_antiguas/(1<<yr>>))	$\text{MIN}((\text{Materiales_MC} + \text{Materiales_ME} + \text{Materiales_SI}), \text{Materiales_Viv_antiguas}) / (1 << \text{yr} >>)$
Materiales_mantenimiento_vías	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales requeridos por años, para el mantenimiento de las vías construidas.	$(\text{Área_vías}/\text{Vida_util_vías}) * \text{Intensidad_materiales_vías}$
Materiales_MC	Auxiliar	Kilogramo	Cantidad de materiales liberado de las demoliciones, para el caso de construcciones bajo el sistema mampostería confinada. En kilogramos.	$\text{Demo_Mconfinada} * \text{Intensidad_MC}$
Materiales_ME	Auxiliar	Kilogramo	Cantidad de materiales liberado de las demoliciones, para el caso de construcciones bajo el sistema mampostería estructural. En kilogramos.	$\text{Demo_Mestructural} * \text{Intensidad_ME}$
Materiales_nuevos_OU	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales nuevos requeridos por año, para la construcción de edificaciones agrupadas en "edificaciones de otros usos, diferentes a vivienda".	$\text{Área_nueva_OU} * \text{Intensidad_SI}$
Materiales_nuevos_vías	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales nuevos requeridos por año, para la construcción de vías urbanas, según los porcentajes de vías que se deben construir por cada metro cuadrado de vivienda construido estipulados por ley.	$\text{Área_nueva_vías} * \text{Intensidad_materiales_vías}$
Materiales_SI	Auxiliar	Kilogramo	Cantidad de materiales liberado de las demoliciones, para el caso de construcciones bajo el sistema industrializado. En kilogramos.	$\text{Demo_SIndustrializado} * \text{Intensidad_SI}$

Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Obsolescencia	Auxiliar	metro ² /yr	Área de las viviendas que llegan al final de su vida útil cada año, y que pueden ser objeto de demoliciones.	$\text{Área_construida}/\text{Vida util promedio de edificaciones}'$
Obsolescencia_Materiales	Auxiliar	Kilogramo/yr	Materiales de las viviendas que llegan al final de su vida útil cada año, y que pueden ser objeto de demoliciones.	$\text{Inventario_Materiales}/\text{Vida util promedio de edificaciones}'$
Otros usos	Auxiliar	metro ² /yr	Área liberada producto de las demoliciones que tiene como destino otros usos diferentes a la construcción de viviendas.	$\text{Área_demolida}*\text{Tasa_otros_usos}$
Personas_por_vivienda	Auxiliar	Persona/vivienda	Es una medida el grado de hacinamiento que se da en las viviendas en Colombia. Representa el número de personas que habían una vivienda promedio en Colombia. Y se calcula como la multiplicación del número de hogares que habitan una vivienda en promedio, por la cantidad de personas que en promedio conforman un hogar.	$\text{Hogares_por_vivienda}*\text{Personas_por_hogar}$

PIB_per_cápita Auxiliar Pesos
 PIB per cápita para Colombia en COP 2005. Proyecciones tomadas del FMI hasta 2019, en adelante se asume la tasa de crecimiento de 2019 con respecto a 2018 de las mismas proyecciones. Serie tomada: Imf_1980-2018.nominal_gdp_busd.xlsx.



Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Población	Auxiliar	Persona	Proyecciones de la población disponibles en el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), datos disponibles desde 1985 hasta 2020. Para los años siguientes a 2020, se toma como porcentaje de incremento de la población anual, el % de incremento del año 2020 con respecto a 2019.	
Salida_mat_and	Auxiliar	Kilogramo/yr		$\text{materiales_Anden}/\text{Vida_util_andenes}$
Salida_mat_vías	Auxiliar	Kilogramo/yr		$\text{materiales_vías}/\text{Vida_util_vías}$
Salida_materiales_dem_OU	Auxiliar	Kilogramo/yr		$\text{Demoliciones_OU} * \text{Intensidad_SI}$
Tasa_residuos	Auxiliar	Kilogramo/yr		$(\text{Materiales_demolición} * (1 - \text{Tasa_reciclaje_RCD})) / 1 \llcorner \text{yr} \gg$
Tiempo_demolición	Auxiliar	yr	Se asume que el tiempo máximo que dura una vivienda es de 101 años. Por lo tanto ninguna vivienda puede superar los 101 años de vida.	$20 \llcorner \text{yr} \gg$
Vida útil promedio de edificaciones	Auxiliar	yr	González (2005), realiza una investigación sobre la vida útil promedio de las edificaciones, como resultado de la ponderación de la vida útil de los materiales, encontrando que la vida útil de los edificios está entre 47 y 75 años.	$61 \llcorner \text{yr} \gg$
Viviendas_construidas	Auxiliar	vivienda	Unidades de vivienda construidas por año.	$\text{Área_construida}/\text{Área_por_vivienda}$

Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Viviendas_requeridas	Auxiliar	vivienda	Unidades de vivienda requeridas para que exista una relación de uno a uno entre el número de hogares y el número de viviendas construidas en Colombia.	$\text{Población/Personas_por_vivienda}$
Área_nueva_OU	Auxiliar	metro ² /yr	Área nueva construida por año, para construcciones agrupadas en "otros usos diferentes a vivienda".	$\text{MAX}(\text{Licencias_aprobadas_otros_usos}, 0 \llcorner \text{metros}^2/\text{yr} \gg)$
Área liberada para construcción	Auxiliar	metro ² /yr	Según cifras del plan parcial de Naranjal en Medellín, el 62% del área total disponible será destinado para construir viviendas (EDU, 2014).	$(\text{Área_demolida} * \text{Tasa_redensificación}) * 1 \llcorner 1 / \text{yr} \gg$
Área total construida	Auxiliar	metro ²		$\text{Área_construida} + \text{Área_viviendas_antiguas}$
Área_ap_Mconfinada	Auxiliar	metro ²	Representa el porcentaje de las licencias aprobadas anuales que son destinadas para construir viviendas bajo el sistema constructivo mampostería confinada.	$\text{Participación_MC} * (\text{Área_iniciada} * 1 \llcorner \text{yr} \gg)$
Área_ap_Mestructural	Auxiliar	metro ²	Representa el porcentaje de las licencias aprobadas anuales que son destinadas para construir viviendas bajo el sistema constructivo mampostería estructural.	$\text{Participación_ME} * (\text{Área_iniciada} * 1 \llcorner \text{yr} \gg)$
Área_ap_Sindustrializado	Auxiliar	metro ²	Representa el porcentaje de las licencias aprobadas anuales que son destinadas para construir viviendas bajo el sistema constructivo industrializado.	$\text{Participación_SI} * (\text{Área_iniciada} * 1 \llcorner \text{yr} \gg)$
Área_finalizada	Auxiliar	metro ² /yr	Área de las viviendas finalizadas por año.	$\text{DELAYMTR}(\text{Área_en_construcción}, \text{Período_finalización_viviendas}, 3) / (1 \llcorner \text{yr} \gg)$

Variable	Tipo	Unidades	Descripción	Expresión matemática
Área_iniciada	Auxiliar	metro ² /yr	El decreto de presidencia 2060 de 2004 fijó el área mínima de las cesiones urbanísticas gratuitas para zonas verdes, parques o equipamientos en el 25% del área total aprobada en las licencias, esto para el caso de las viviendas tipo VIS, con lo cual tenemos que solo el 75% del área aprobada en las licencias, es realmente construible.	$\text{MIN}(0.75 * \text{Licencias_aprobadas}, 0.75 * \text{Área_disponible} * 1 \llcorner 1/\text{yr} \gg) // \text{Licencias aprobadas}$
Área_Mconfinada	Auxiliar	metro ²	Área inicial construida bajo el sistema mampostería confinada. En m ² .	$\text{Participación_MC} * (\text{Inventario_inicial_área})$
Área_Mestructural	Auxiliar	metro ²	Área inicial construida bajo el sistema mampostería estructural. En m ² .	$\text{Participación_ME} * (\text{Inventario_inicial_área})$
Área_nueva_vías	Auxiliar	metro ² /yr	Área nueva construida por año, para vías urbanas.	$\text{Andenes_vías} * \text{Porcentaje_vías}$
Área_por_vivienda	Auxiliar	metro ² /vivienda	Según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, en Colombia se presenta una densidad de 100 viviendas por hectáreas, una hectárea corresponde a 10.000 m ² si se divide 10.000/100 tenemos que en promedio una vivienda tiene un área de 100 m ² .	$100 \llcorner \llcorner \text{metros}^2/\text{vivienda} \gg \gg$
Área_SIndustrializado	Auxiliar	metro ²	Área inicial construida bajo el sistema industrializado. En m ² .	$\text{Participación_SI} * (\text{Inventario_inicial_área})$

Fuente: Elaboración propia