

Fabricación de bloques de tierra comprimida con adición de residuos de construcción y demolición como reemplazo del agregado pétreo convencional

Alejandro Vásquez Hernandez ¹, Luis Fernando Botero Botero ²y David Carvajal Arango³

Recepción: 14-10-2014 | Aceptación: 04-12-2014 | Disponible en línea: 30-01-2015

doi:10.17230/ingciencia.11.21.10

Resumen

El presente artículo plantea una alternativa que contribuye a dar un paso hacia el ciclo continuo Reciclaje-Fabricación-Uso-Reciclaje, a partir de contemplar la posibilidad de entender los residuos como materia prima de nuevos procesos, disminuyendo a su vez la extracción de materiales. Para ello se propone la fabricación de bloques de tierra comprimida a partir de la utilización de la tierra resultante del proceso de excavación y la adición de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como agregado, sustituyendo la totalidad del agregado tradicionalmente utilizado. Los bloques con adición RCD, cumplieron con las especificaciones físicas y mecánicas establecidas por la Norma Técnica Colombiana.

Palabras clave: bloque de tierra comprimida; residuos de construcción y demolición; sostenibilidad; ciclo de los materiales; impacto ambiental; gestión de recursos

¹ Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, avasqu12@eafit.edu.co.

² Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, lfbotero@eafit.edu.co.

³ Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, dcarvaj6@eafit.edu.co.

Fabrication of Compressed Earth Blocks with the Addition of Construction and Demolition Debris Instead of the Conventional Rocky Aggregate

Abstract

The present article suggests an alternative that contributes to give a step towards the continuous cycle of Recycling-Fabrication-Use-Recycling from considering the possibility of understating debris as a raw material for new processes, thus reducing the extraction of materials. To that end this article suggests the fabrication of compressed earth blocks from the use of the resulting earth from construction and demolition (C&D) debris as aggregates, this way substituting the use of traditional aggregates completely. Blocks with RCD addition comply with the physical and mechanical specifications established by the Colombian technical standard.

Key words: compressed earth block; construction and demolition waste; sustainability; cycle of materials; environmental impact; resources management

1 Introducción

La industria de la construcción ha asumido un rol protagónico en el desarrollo de las sociedades, debido a que es responsable directa de la creación de proyectos a través de los cuales además de gestarse cultura, se contribuye al crecimiento económico. A su vez es uno de los responsables principales del consumo de recursos, generación de residuos, transformación del entorno y contaminación. Por tal motivo, es pertinente que desde esta industria se planteen soluciones alternativas que contribuyan a disminuir su impacto sobre el ambiente.

La tierra como material de construcción, debido a su abundancia, a la baja energía incorporada en sus procesos de transformación, a sus propiedades térmicas y acústicas, a ser un recurso económicamente asequible y a la posibilidad de reciclarla o reutilizarla una vez cesa la vida útil de los elementos, ha sido objeto de estudio de diversas investigaciones que buscan analizar las técnicas de construcción en tierra tradicionales [1],[2] y aportar mejoras en sus propiedades físicas [3] y mecánicas [4],[5], en la sistematización e industrialización en los procesos de fabricación [6],[7], en el estudio y control sobre patologías presentadas [8],[9] y contribuir a la

regulación de dichas técnicas sirviendo como soporte de futuras normativas [10],[11]. Una de las técnicas estudiadas y aplicadas ha sido la fabricación de bloques de tierra comprimida (BTC) [12],[13], [14],[15]. La tierra utilizada para la fabricación de BTC es una mezcla de arcilla, limo y arena, compactada en una prensa manual. Las cantidades de los componentes, y en consecuencia las características y propiedades de la tierra, dependen del lugar de procedencia. De acuerdo con Gernot Minke [16], la tierra con una óptima distribución granulométrica para elaborar un BTC es aquella que contenga un 14 % de arcilla, 22 % de limo y 64 % de arena, lo cual acarrea que normalmente sea necesario agregar arena a la tierra extraída. Dependiendo de la composición específica de la tierra, varía el porcentaje de arena a agregar. Sin embargo, los porcentajes de adición de este material se mueven normalmente en un rango entre el 40 y el 60 % del peso total de la mezcla. Debido a que la arena, agregado pétreo no renovable, constituye un insumo fundamental, la fabricación de BTC está directamente ligada a la extracción de materia prima y, en consecuencia, al modelo productivo característico de la industria contemporánea, condensado en la secuencia lineal Extracción-Fabricación-Uso-Residuo, el cual se basa en el consumo de recursos provenientes de extracción, contribuyendo así a la problemática ambiental de fondo, es decir, un consumo de recursos y una generación de residuos que está por encima de lo que el planeta puede generar y admitir.

Conforme a lo anterior, la presente investigación plantea una alternativa que contribuye al cierre del ciclo de los materiales, haciendo un intento por pasar de la secuencia lineal descrita al ciclo continuo Reciclaje-Fabricación-Uso-Reciclaje, teniendo por objetivo la fabricación de BTC, que cumplan con las especificaciones normativas vigentes para su utilización como material de construcción en el contexto colombiano, a partir de la utilización de tierra considerada como residuo, es decir, producto de actividades de excavación y/o preparación de terreno de una obra de construcción, con adición de residuos de construcción y demolición (RCD) como reemplazo total del agregado convencionalmente utilizado (arena).

2 Sostenibilidad. Extracción de recursos y generación de residuos

Abordar el tema de la sostenibilidad exige hacer mención del crecimiento económico que a nivel mundial se ha presentado desde la segunda mitad del siglo XX. Sin desconocer los importantes avances sociales que éste ha generado, es oportuno subrayar que mientras los indicadores económicos han sido durante años sistemáticamente positivos, los indicadores ambientales resultan cada vez más negativos. La vinculación entre estos indicadores ha sido objeto de diversos estudios, como el informe producido por el Club de Roma en 1972, “Los límites de crecimiento” [17], el cual pone en duda, a partir de dicho vínculo, la posibilidad de un crecimiento económico sostenido en el tiempo, estableciendo límites que pueden cuantificarse a través de conceptos como el de huella ecológica, definido como “el área de territorio ecológicamente productiva, necesaria para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos por una población” [18]. Conforme a los ritmos de consumo de recursos y generación de residuos propios del actual modelo de crecimiento, se estima una huella ecológica media por habitante necesaria de 2,8 hectáreas [19], lo cual está muy por encima de lo que el planeta puede generar y admitir, que alcanza a lo sumo las 1,7 hectáreas por habitante, incluyendo los ecosistemas marinos. Es decir que, a nivel global, el consumo de recursos y la generación de residuos están por encima de lo que el planeta puede generar y admitir. Este desequilibrio se intensifica frente al fenómeno de crecimiento demográfico, estimado en un promedio de 3 %, con excepción de China e India para los cuales se estima un crecimiento del 5 %, debido a que la cantidad de recursos necesarios para satisfacer las necesidades de un grupo humano depende de la cantidad de integrantes de dicho grupo y de sus lógicas de consumo, por lo que, si se mantienen dichas lógicas, un incremento en el número de integrantes viene acompañado de un incremento en la demanda de recursos, lo cual contribuye al desequilibrio mencionado. Los sistemas naturales que soportan la demanda tienen, en algunos casos, ritmos de generación de recursos inferiores al ritmo de incremento de la demanda, y, en otros casos, son recursos limitados, no renovables.

En la aplicación de este discurso al campo de la construcción cabe resaltar que esta industria y sus actividades relacionadas aportan el 10 %

del producto interno bruto (PIB) mundial y emplean alrededor de 111 millones de personas en todo el mundo [20]. En países de grandes economías genera el 15 % de los empleos y aporta entre el 5 % al 15 % del PIB [21]. En Colombia, para el segundo trimestre del año 2013, el sector fue responsable de la generación del 6,4 % del PIB [22]. Asimismo, durante los últimos años llegó a emplear hasta 1,4 millones de personas, llegando a estabilizarse en 1,2 millones de personas empleadas.

A su vez, la industria de la construcción juega un papel fundamental en lo que respecta al consumo de recursos y generación de residuos. Es responsable del consumo del 40 % de las materias primas en el mundo; equivalente a 3 000 millones de toneladas por año, el 17 % del agua potable [23], el 70 % del total de los recursos madereros [24], el 10 % de la tierra cultivable [25], un 20 % del total de la energía mundial es consumida durante el proceso de construcción, elaboración de materiales y demolición de las obras de construcción [20], y consume casi exclusivamente los materiales pétreos, los cuales pertenecen a la categoría de recursos no renovables. Asimismo, genera el 30 % de los residuos sólidos mundiales [25] y ha llegado a ser, en la mayoría de los países, el principal generador de los gases de efecto invernadero; con emisiones que para el 2004 alcanzaban 1,8 billones de toneladas métricas según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático y que podría alcanzar los 15,6 billones de toneladas métricas para el 2030, si se siguen los modelos actuales [26].

La sostenibilidad, desde el punto de vista físico, tiene todo que ver con el cierre del ciclo de los materiales, alcanzándose éste, en un sistema determinado, cuando se eliminan totalmente los flujos de residuos y los recursos se reciclan constantemente. Esta pretensión encuentra un obstáculo en el modelo productivo característico de la industria contemporánea, originado en la revolución industrial, y que puede ser condensado en la secuencia lineal Extracción-Fabricación-Uso-Residuo, Figura 1.

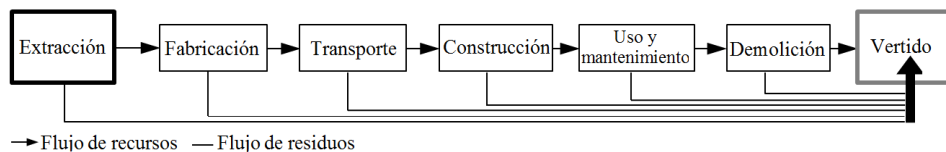


Figura 1: Secuencia lineal de la producción.

Las propuestas que propugnan por el cierre del ciclo de los materiales, cierre parcial, entre las que pueden contarse la presente investigación, suponen la eliminación, más bien reducción, del concepto de residuo, aislando el modelo de las fases de extracción y vertido, con el propósito de pasar de la secuencia lineal descrita al ciclo continuo Reciclaje-Fabricación-Uso-Reciclaje, Figura 2.

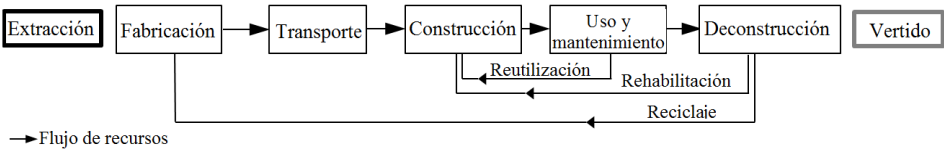


Figura 2: Ciclo continuo de producción.

El modelo de producción vigente, secuencia lineal, con base en los avances tecnológicos ha ido sofisticándose, pero sin modificar su esencia, su rasgo fundamental continúa siendo el mismo: un ritmo de consumo de recursos muy superior al ritmo de generación recursos del planeta, y un ritmo de producción de residuos muy superior al ritmo de asimilación del planeta. Siendo además estos dos ritmos impuestos por la sociedad, crecientes, mientras que los ritmos impuestos por los sistemas naturales de soporte son limitados.

2.1 Explotación de recursos pétreos en el Valle de Aburrá

Al observar el área construida y las discontinuidades del verde característico de las montañas que rodean el Valle de Aburrá, en Antioquia, se advierte que el fenómeno de la metropolización ha incidido en el ambiente natural circundante. Los métodos empleados hoy en día para la obtención de recursos naturales y el impacto ambiental asociado, han despertado el interés por minimizar las problemáticas generadas; se han venido creando leyes reguladoras de la actividad minera, buscando disminuir la informalidad, la contaminación y controlar la sobreexplotación de recursos naturales renovables y no renovables.

La extracción de recursos pétreos es fundamental para la actividad constructora en la región y los precios de estos impactan directamente la eco-

nomía, el desarrollo y a la sociedad [27]. En ocho de los diez municipios que conforman el Valle de Aburrá hay actividades de extracción, y en la totalidad de las minas el material pétreo constituye el objeto principal de la actividad. Es decir, las actividades de extracción en el Valle de Aburrá se encuentran directamente asociadas a la industria de la construcción.

Tabla 1: Tipo de material extraído en cada municipio [27]

Municipio	Numero de Minas	Material
Caldas	6	Arena y roca triturada
Sabaneta	0	N/A
La Estrella	5	Arcilla, roca triturada y material aluvial
Itagui	11	Arcilla, arena y material aluvial
Envigado	0	Arcilla, N/A
Medellin	17	Arcilla, arena, roca triturada y material aluvial
Bello	19	Arcilla, roca triturada y material aluvial
Copacabana	13	Arcilla, roca triturada y material aluvial
Girardota	7	Gravas y arena
Barbosa	4	Arena y material aluvial

La extracción de este tipo de recursos tiene asociados diferentes problemáticas ambientales. Para realizar la extracción de cantera se retira la capa vegetal para alcanzar los horizontes extraíbles, desde ese instante se intervienen los flujos naturales del agua de escorrentía y con ello se aceleran los procesos de erosión y arrastre de material. Adicionalmente, la erosión propicia la formación de surcos y cárcavas por donde se filtra el agua y facilita la aparición de planos de fallas, propiciando deslizamientos. Posteriormente, al finalizar la extracción del material pétreo, la recuperación de la capa vegetal es difícil y lenta, las depresiones generadas afectan las dinámicas naturales de las corrientes de agua y aire, y la morfología cambia. A estas depresiones, posteriormente, se les dan diferentes usos, dependiendo de la viabilidad técnica, entre los que se cuentan el uso como tierra urbanizable, como escombreras o rellenos sanitarios. Asimismo, estas actividades de extracción tienen un alto impacto sobre las fuentes hídricas y los asentamientos humanos aledaños.

Sin embargo, la problemática no gira solo en torno a los impactos ambientales asociados a la explotación de este tipo de recursos, sino además a la condición de no renovación que tienen estos. No puede pretenderse que la explotación de los mismos se conserve ilimitadamente en el tiempo. Para

el caso específico del Valle de Aburrá se cuenta con una cualificación de las reservas existentes de recursos pétreos (incluye arenas, gravas, triturados y arcillas) que estima un total de 68473952 m^3 . Las reservas disponibles según el material se presentan en la Tabla 2

Tabla 2: Reservas aproximadas de recursos pétreos en el Valle de Aburrá

Material	Reservas aproximadas
Arenas	17 186.360
Gravas y Arenas	11 620.112
Arcillas	3 255.896
Triturados y Arenas	36 411.584

2.2 Residuos de construcción y demolición (RCD) en el Valle de Aburrá

Diversos investigadores y entidades han dedicado esfuerzos a valorar la generación diaria de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en el Valle de Aburrá. En 1997 se estimó la generación de 6 000 toneladas de RCD por día, que para el 2003 disminuyó a 4 000 ton/día debido a la crisis de la Unidad de Poder Adquisitivo Constante (UPAC) de 1998, que desactivo la industria constructora en el país [28]. En el 2005, el ‘Estudio para el diseño de valoración de residuos de escombros mediante el diseño de un sistema de gestión integral de los mismos para la producción más limpia en la ciudad de Medellín’ de la ASOP-Secretaría del Medio Ambiente, municipio de Medellín, calculó una generación de 6 900 ton/día [29]. El Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regional del Valle de Aburrá PGIRS Regional, hace referencia a la estimación realizada por Javier Bocanumenth de 7 287,47 ton/día [30]. En el 2011, el Semillero de Investigación de la Construcción SIC de la Universidad EAFIT, en el informe de investigación ‘Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición, y su contribución a la sostenibilidad de las regiones’, presentó una estimación de la producción de RCD en las construcciones nuevas en el Valle de Aburrá y Oriente Cercano, desde el año 2000 hasta el 2010. Para ello se basó en los informes anuales presentados por la Cámara Colombiana de la Construcción (Camacol) relacionados con los metros cuadrados de construcción nueva y en el volumen y la densidad de los escombros, $1,35m^3/m^2$

y 1,4 ton/ m^3 respectivamente, contemplados en el PGIRS Regional. La estimación resultante se muestra en la Tabla 3

Tabla 3: Construcción nueva y RCD en el Valle de Aburrá y Oriente Cercano [31]

Año	construcción ($m^2/año$)	RCD ($m^3/año$)	RCD (ton/día)
2000	415449	560856.15	2151.23
2001	522013	772217.55	2961.93
2002	1056362	1426088.7	5469.93
2003	1420555	1917749.25	7355.75
2004	1162529	1569414.15	6019.67
2005	1247141	1683640.35	6457.80
2006	1261464	1702976.4	6531.96
2007	2121546	2864087.1	10985.54
2008	1627087	2196567.45	8425.19
2009	875765	1182282.75	4534.78
2010	1205214	1627038.9	6240.70

Es conveniente resaltar que los datos anteriores no involucran los RCD generados por obras públicas, reformas y adecuaciones, actividades constructivas también generadoras y que representan aproximadamente el 10 % del total de los residuos del sector de la construcción. Las cantidades de RCD generadas no son el único aspecto que debe ser considerado, asuntos como el costo de almacenamiento, carga, transporte y disposición final, que pagan constructores y ciudades por estos residuos, generan grandes interrogantes. El PGIRS Regional informó que para el 2004 Corantioquia identificó 45 escombreras en el Valle de Aburrá, de las cuales solo 11 tenían autorización para funcionar. En el 2005, el estudio identificó 16 escombreras y, nuevamente, solo 11 tenían permiso. Cabe resaltar que algunas de las escombreras identificadas son destinadas a llenos estructurales, los cuales tienen una vida útil relativamente corta, posible causa de que 29 escombreras hayan clausurado de un año a otro [30]. Al funcionamiento de escombreras no autorizadas se les asocia generalmente falta de capacidad técnica para disponer los RCD, contribuyendo a la contaminación del suelo, del paisaje, del aire, de las fuentes hídricas, entre otros. Además, el problema se ve atizado en la medida en que la disposición final de los RCD se hace en lugares no aptos para tal fin, como lotes baldíos, separadores de vías y bordes de quebradas.

3 Construcción con tierra

La tierra es el material de construcción más utilizado por el hombre a lo largo de la historia. Se han encontrado adobes en tierra moldeados a mano en la ciudad de Jericó cuyos orígenes se remontan al octavo milenio antes de nuestra era, así como moldes de geometría regular en madera para la elaboración de adobes que aparecieron casi simultáneamente en Sumeria y Perú, hace alrededor de 5 000 años, los cuales permitieron una mayor producción de adobes y de mejor calidad [32]. En Europa y Asia se pueden encontrar construcciones en tierra que datan de los siglos VII y VI a.C. En Grecia todavía se conservan murallas hechas a partir de bloques de tierra cocida al sol que datan del siglo IV d.C. [33]. En África el uso de la tierra cocida se ha mantenido vigente como una tradición cuyos orígenes se ubican en las grandes civilizaciones antiguas de ese continente, razón por la cual en países como Egipto y Costa de Marfil se encuentran construcciones recientes que se han realizado de manera similar a las construcciones antiguas. En América, en la mayoría de los pueblos precolombinos, fue generalizado el uso de la tierra, especialmente del adobe [34]. En Perú se encuentran las ruinas de notables templos construidos en tierra 200 años antes de la llegada de los españoles. En el territorio donde actualmente se encuentra Colombia surgieron importantes culturas indígenas, la cuales desarrollaron ciudades con evidentes formas simbólicas, utilizando los recursos existentes en su entorno inmediato. Durante el período de la conquista y colonia, las técnicas indígenas se adecuaron a las técnicas traídas desde el continente europeo, lo que estableció el uso de del bahareque, el adobe y la tapia pisada, con lo que fueron construidas la gran mayoría de las ciudades del país.

Pero la tierra como material de construcción no constituye solo una técnica histórica que pueda calificarse como obsoleta, los casos de proyectos en que este material constituye la materia prima fundamental no se encuentran solo en el pasado sino que actualmente pueden hallarse casos de aplicación en diferentes partes del mundo. Citando solo algunos, en Francia, en la comuna Villefontaine se creó una aldea en tierra conocida como Village-Terre, proyecto que cuenta con 65 unidades habitacionales en 2,2 hectáreas y ha sido clasificado como uno de los 45 tesoros del desarrollo sostenible de la región Ródano-Alpes. En India, en Mount Abu Rajasthan, se construyó un prototipo de vivienda de bajo costo en el campus de

la Brahma Kumaris World Spiritual University. Los bloques para la construcción de este proyecto se realizaron con suelos locales no estabilizados, compactados por prensa manual. En Nueva Delhi, se construyó una oficina conformada por cúpulas, con la finalidad de demostrar la eficiencia térmica de la tierra respecto de las construcciones tradicionales de hormigón. La cúpula principal tiene una luz libre de 5,4 metros y todo el complejo está construido con bloques de suelo compactado con prensa manual. El proyecto representó un ahorro en los costos de construcción del 22 % respecto de una construcción tradicional de hormigón. En Malí, el Museo Nacional, ubicado en Bakamo, está construido con bloques de suelo estabilizado y revocado con suelo cemento. En Burkina Faso, el Instituto Panafricano en Ouagadougou cuenta con 5 000 m^2 construidos destinados a la investigación, la educación y la vivienda de estudiantes y profesores. Todos sus elementos, muros, bóvedas y cúpulas, fueron construidos con bloques de suelo local estabilizado, los cuales fueron fabricados en el sitio de la construcción, implicando un ahorro en el costo de transporte de materiales. El revoque exterior se realizó con barro estabilizado con cal y cemento. El proyecto se hizo acreedor al Premio de Arquitectura Aga Khan. En La Paz, Bolivia, fue construido el Centro Cultural en el marco de un convenio de la alcaldía de la ciudad y algunas instituciones alemanas, entre ellas la Universidad de Kassel. Para la elaboración manual de adobes se utilizó un molde especial que lograba bordes redondeados para permitir confort acústico. éstos fueron utilizados en la construcción de la cúpula principal de 8,8 m de luz y 5,65 m de altura, la cual es única en el continente. En Colombia, entre otros casos, se encuentra la empresa colombiana Protierra S.A., la cual se dedica a la investigación y el desarrollo de procesos constructivos que utilicen la tierra cruda como material de muros y acabados, que además de cubrir integralmente diferentes técnicas de la arquitectura en tierra como tapia pisada, bahareque y adobe, entre otras, se ha especializado en la elaboración de material de mampostería producido con maquinaria de alta tecnología: Bloques de Tierra Comprimida (BTC). La empresa ha participado en proyectos en diferentes países en el mundo, como Colombia, Venezuela, India, Zaire, Senegal, Camerún, Francia, Bélgica, España, Alemania y Haití.

Actualmente el 30 % de la población mundial, aproximadamente 1 500 millones de personas, vive en construcciones en tierra; para el caso de los países no desarrollados cerca del 50 % de su población rural y el 20 % de la

población urbana habitan en edificaciones de tierra. En Perú cerca del 60 % de las casas están hechas en adobe o tapia, en India esta cifra asciende a 73 % que equivale a 67 millones de casas en donde habitan 374 millones de personas [35].

La proliferación y permanencia de las distintas técnicas de construcción en tierra se le atribuyen a las múltiples ventajas de este material, entre ellas la abundancia de ésta como materia prima, el 74 % de la corteza terrestre es tierra, y entre el 65 y el 70 % de las tierras contienen materias primas adecuadas para su utilización como material de construcción. Es un material con baja energía incorporada en sus procesos de transformación, no requiere de grandes desplazamientos en su transporte debido a la facilidad de obtención de manera local, ni tiene asociados procedimientos de cocción a altas temperaturas. Sus propiedades térmicas y acústicas, su inercia térmica permite atenuar los cambios de temperatura externos y crear un ambiente interior confortable y los elementos contruidos con este material transmiten mal las vibraciones sonoras dándole buenas capacidades como aislante. Es un material transpirable permitiendo la regulación natural de la humedad del interior de los espacios y evitando así las condensaciones, y, una vez cesa la vida útil de los elementos constructivos, es posible reciclar o reutilizar los residuos.

Además de la ya mencionada facilidad de obtención local, esto relacionado con la característica de ser un recurso económicamente asequible, de bajo costo y en muchas ocasiones gratuito por constituir un residuo proveniente de la etapa de excavaciones para cimentación de la estructura o preparación del terreno, la sencillez de las herramientas necesarias para manejarla, la facilidad de capacitación para la adecuada utilización de la maquinaria asociada a la fabricación de los elementos, en los casos en que los procesos de compactación se realizan mediante prensas, hacen factible la aplicación de técnicas de construcción con tierra en operaciones de autoconstrucción. Esto es de especial importancia en ciudades como Medellín en donde el 60 % de las construcciones se han llevado a cabo a través de procesos de autoconstrucción [36], siendo los mismos usuarios los que se encargan de la evolución de las viviendas en el tiempo, normalmente sin la participación de arquitectos o ingenieros civiles, generalmente debido a factores económicos. Es decir, que solo en el 40 % restante participan profesionales relacionados con el quehacer constructivo, por lo que es pertinente

entonces que las pretensiones de sostenibilidad buscadas a través del campo de los materiales de construcción no constituyan propuestas únicamente aplicables a este 40 %. Esto se ve subrayado por la generalizada aparición de proyectos gestionados a través de asociaciones comunitarias, como respuesta al déficit de vivienda social, en muchos de los cuales la autogestión se complementa con participación en actividades de construcción por parte de la comunidad.

Estos aspectos, que tienen aparición en la mayoría de ciudades latinoamericanas, dan cuenta de la importancia del estudio y desarrollo de técnicas constructivas que constituyan opciones viables económica, ambiental y socialmente, de materiales de construcción, aplicables tanto al ejercicio tradicional de la construcción, en manos de constructores, como al ejercicio de la autoconstrucción, como contribución a la generación de procesos sociales de sostenibilidad, en la medida en que constituyen un medio de cohesión social, de fortalecimiento del sentido de comunidad y de vecindario.

Las cualidades mencionadas han sido avistadas por centros científicos y académicos en todo el mundo, los cuales han desarrollado procesos de investigación que buscan alejar las técnicas de construcción en tierra de la improvisación, informalidad y poco sistematización con la que tradicionalmente se han llevado a cabo, atribuible a los medios orales por medio de los cuales se han enseñado las técnicas, de una generación a otra.

4 Bloques de tierra comprimida con adición de residuos de construcción y demolición

Debido a la problemática ambiental presente, al ritmo de extracción y de consumo de recursos pétreos en el Valle de Aburrá, asociado con la industria de la construcción, a la cantidad de tierra considerada como residuo y destinada a los botaderos, y a las posibilidades que abre este material para la autoconstrucción, así como a la prevalencia en la región de la construcción en concreto y materiales cerámicos, siendo estos los residuos de construcción que se presentan en mayor volumen, se consideró oportuno proponer la fabricación de BTC, utilizando RCD triturado como sustituto del agregado pétreo convencional.

Para la investigación se fabricaron mampuestos con diferentes dosifica-

ciones, con la finalidad de explorar la relación entre las propiedades finales de los elementos y el porcentaje del agregado no convencional utilizado. Para cada dosificación explorada se fabricaron elementos utilizando agregado pétreo convencional, con el propósito de comparar las características físicas y mecánicas de los BTC con adición de RCD triturado con respecto a los BTC con agregado convencional. La Tabla 4 muestra las dosificaciones utilizadas, siendo BC bloque convencional y BCRCDBloque con RCD triturado:

Tabla 4: Dosificaciones

Muestra	Composicion			
	Tierra	Cemento	Arena	RCD
BC1	45 %	5 %	50 %	0 %
BC2	35 %	5 %	60 %	0 %
BC3	25 %	5 %	70 %	0 %
BCRCDB1	45 %	5 %	0 %	50 %
BCRCDB2	35 %	5 %	0 %	60 %
BCRCDB3	25 %	5 %	0 %	70 %

4.1 Materiales y fabricación

La tierra utilizada en la elaboración de los bloques, limo de alta compresibilidad (MH), fue la resultante del proceso de excavación para la nivelación de terreno y cimentaciones del conjunto residencial Claro Verde, construido por Coninsa Ramón H. S.A., en el municipio La Estrella, Antioquia. Se empleó cemento Portland tipo I de Argos y arena de pega distribuida localmente de la Cantera Santa Rita S.A. Para el caso de los RCD se hizo uso de los residuos generados por el Laboratorio de Suelos, Concretos y Pavimentos de la Universidad EAFIT, concretos y materiales cerámicos. Asimismo, se hizo uso de trituradoras de mandíbula del Departamento de Geología de la misma universidad, con la finalidad de tener un acercamiento directo al proceso de trituración de los RCD.

Los BTC se fabricaron en la máquina de tracción manual CINVA-RAM, la cual es producto de las investigaciones del Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento (CINVA), llevado a cabo en Colombia en los años cincuenta. Los encargados de fabricar los bloques fueron estudiantes de la universidad de EAFIT, entre segundo y cuarto semestre de ingeniería civil,

sin conocimientos profundos de procesos constructivos, con la finalidad de acercar la fabricación a las dinámicas propias de los procesos de autoconstrucción.

Para la fabricación de los bloques, inicialmente, se prepara la mezcla, se limpia y lubrica el recipiente de la CINVA-RAM, se vierte la mezcla en tres capas, entre las cuales se ejerce presión en las cuatro esquinas y en el centro para obtener un llenado uniforme y reducir espacios de aire, en la tercera capa se enrasa y se verifica que no queden vacíos en la superficie, se cierra el recipiente y se acciona el mecanismo bajando la palanca de la CINVA-RAM, que aplica presión sobre el material y conforma el bloque. Luego, se regresa la palanca a su posición de descanso o inicial y se retira el bloque tomándolo por las caras laterales para evitar daños en las aristas. En el almacenado de los bloques se debe evitar el contacto directo con el suelo y la transferencia de humedad. Además el lugar destinado para tal fin debe ser aireado, fresco y protegido de la intemperie. Durante la semana siguiente a la fabricación el bloque debe curarse, rociado con agua todas sus caras. A los 28 días se realizaron los ensayos de laboratorio pertinentes de acuerdo a la normatividad.

4.2 Ensayos

A los bloques fabricados se les realizaron los ensayos de resistencia a la compresión, capilaridad y abrasión. En la Tabla 5 se pueden apreciar los resultados del ensayo a compresión. La finalidad del ensayo de resistencia a la capilaridad es hallar el coeficiente de absorción de agua de los bloques, definiendo los siguientes intervalos para la interpretación de la prueba:

- Cb menor o igual a 20 corresponde a bloques débilmente capilares.
- Cb mayor a 20 y menor o igual a 40 corresponde a bloques poco capilares. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 5: Resultados ensayos de resistencia a la compresión.

ID	Muestra	Composicion				Resistencia Mpa
		Tierra	Cemento	Arena	RCD	
1	BC1	45 %	5 %	50 %	0 %	1.99
2	BC1	45 %	5 %	50 %	0 %	2.40
3	BC1	45 %	5 %	50 %	0 %	2.45
4	BC1	45 %	5 %	50 %	0 %	1.78
9	BC2	35 %	5 %	60 %	0 %	2.24
10	BC2	35 %	5 %	60 %	0 %	2.88
11	BC2	35 %	5 %	60 %	0 %	3.52
12	BC2	35 %	5 %	60 %	0 %	2.75
17	BC3	25 %	5 %	70 %	0 %	3.23
18	BC3	25 %	5 %	70 %	0 %	2.74
19	BC3	25 %	5 %	70 %	0 %	2.84
20	BC3	25 %	5 %	70 %	0 %	2.32
25	BCRCD1	45 %	5 %	0 %	50 %	2.93
26	BCRCD1	45 %	5 %	0 %	50 %	3.69
27	BCRCD1	45 %	5 %	0 %	50 %	3.23
28	BCRCD1	45 %	5 %	0 %	50 %	3.15
33	BCRCD2	35 %	5 %	0 %	60 %	2.91
34	BCRCD2	35 %	5 %	0 %	60 %	4.24
35	BCRCD2	35 %	5 %	0 %	60 %	3.59
36	BCRCD2	35 %	5 %	0 %	60 %	3.54
41	BCRCD3	25 %	5 %	0 %	70 %	5.50
42	BCRCD3	25 %	5 %	0 %	70 %	5.74
43	BCRCD3	25 %	5 %	0 %	70 %	5.43
44	BCRCD3	25 %	5 %	0 %	70 %	4.68

Tabla 6: Resultados ensayo de capilaridad

Id	Muestra	Composicion				Coeficiente de capilaridad	Dictamen
		Tierra	Cemento	Arena	RCD		
5	BC1	45 %	5 %	50 %	0 %	22.47	Poco capilar
6	BC1	45 %	5 %	50 %	0 %	72.77	————
13	BC2	35 %	5 %	60 %	0 %	23.43	Poco capilar
14	BC2	35 %	5 %	60 %	0 %	24.21	Poco capilar
21	BC3	25 %	5 %	70 %	0 %	59.57	————
22	BC3	25 %	5 %	70 %	0 %	44.58	————
29	BCRCD1	45 %	5 %	0 %	50 %	38.47	Poco capilar
30	BCRCD1	45 %	5 %	0 %	50 %	47.94	————
37	BCRCD2	35 %	5 %	0 %	60 %	66.72	————
38	BCRCD2	35 %	5 %	0 %	60 %	61.42	————
45	BCRCD3	25 %	5 %	0 %	70 %	31.62	Poco capilar
46	BCRCD3	25 %	5 %	0 %	70 %	34.58	Poco capilar

La norma no contempla cual es el criterio de capilaridad para bloques donde el coeficiente de capilaridad C_b sea mayor a 40, por lo cual las muestras 6, 21, 22, 30, 37 y 38 no tienen dictamen. En lo referente al coeficiente de abrasión (C_a), cabe anotar que en la Norma Técnica Colombiana NTC 5324 solo es contemplado el caso de bloques macizos. Se optó por realizar el ensayo a pesar de tratarse de bloques con perforación vertical.

Los intervalos de resistencia a la abrasión están ligados a la resistencia seca de los bloques para su clasificación según la Norma, en donde se estipulan los siguientes valores:

Tabla 7: Clasificación de BSC para determinar el C_a

Bloques Macizos	BSC20	BSC40	BSC60
Resistencia a la compresión seca (MPa)	2	4	6
Coeficiente de abrasión mínima C_a (cm ² /g)	2	5	7

Los bloques sometidos a ensayo se muestran en la Figura 3 y los resultados obtenidos se presentan a continuación:

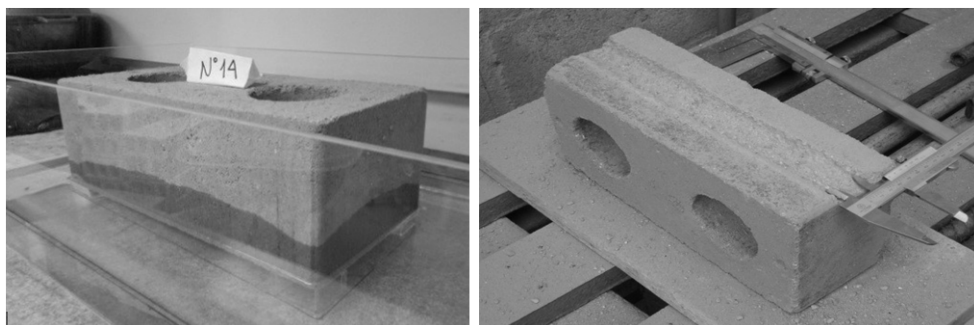


Figura 3: Ensayos de capilaridad y abrasión

Tabla 8: Resultados ensayo de abrasión

Id	Muestra	Composición				Resistencia Prom (MPa)	Coeficiente de abrasión Ca (cm2 /g)
		Tierra	Cemento	Arena	RCD		
7	BC1	45 %	5 %	50 %	0 %	2.16	3.02
8	BC1	45 %	5 %	50 %	0 %	2.16	6.53
15	BC2	35 %	5 %	60 %	0 %	2.85	4.83
16	BC2	35 %	5 %	60 %	0 %	2.85	3.28
23	BC3	25 %	5 %	70 %	0 %	2.78	5.88
24	BC3	25 %	5 %	70 %	0 %	2.78	4.98
31	BCRCD1	45 %	5 %	0 %	50 %	3.25	10.80
32	BCRCD1	45 %	5 %	0 %	50 %	3.25	14.28
39	BCRCD2	35 %	5 %	0 %	60 %	3.57	10.13
40	BCRCD2	35 %	5 %	0 %	60 %	3.57	16.20
47	BCRCD3	25 %	5 %	0 %	70 %	5.34	31.73
48	BCRCD3	25 %	5 %	0 %	70 %	5.34	26.96

4.3 Análisis de resultados

La Figura 4 da cuentas del comportamiento de los bloques a compresión con los porcentajes en peso de los agregados:

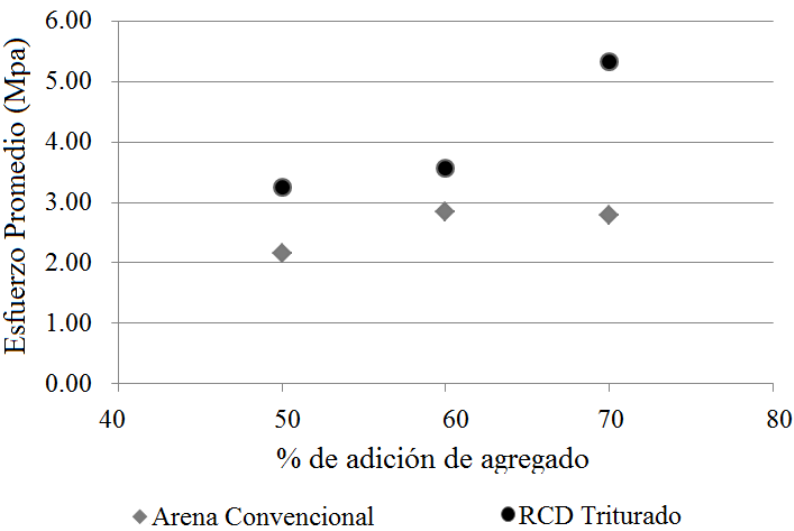


Figura 4: Esfuerzo promedio vs % de adición de agregado

Los bloques con adición de RCD triturado tienen un mejor comportamiento a la compresión que los mampuestos con agregado convencional. Además, se observa que los bloques con agregado convencional alcanzan un esfuerzo promedio máximo con un 60 % de adición de agregados, mientras que en los mampuestos con RCD triturado se observa un esfuerzo promedio creciente relacionado directamente con el porcentaje de adición de agregado.

Todos los bloques presentaron durante el ensayo de compresión fallas plásticas, dadas por la capacidad que tiene la tierra de deformarse y soportar carga. La aparición de grietas verticales es una constante en todos los bloques, aunque se presentan más en los bloques con menor adición de agregado. Los BTC con RCD presentan menos grietas que los mampuestos con agregado convencional.

De las muestras con agregado convencional, aquellas que obtuvieron un coeficiente de capilaridad inferior (entre 20 y 40) correspondiente a un dictamen de poco capilar son aquellas cuyo porcentaje de adición de agregado es 60. El comportamiento capilar obtuvo resultados relacionados con el esfuerzo promedio a la compresión, en donde las muestras con adición de 60 % de agregados presentan un mejor comportamiento. En las muestras con adición de RCD se observa que en los dos primeros porcentajes analizados (50 % y 60 %) los coeficientes de capilaridad están en el límite de los 40 o los sobrepasan. En las muestras con una adición de RCD de 70 %, disminuye el coeficiente de capilaridad y se ubican en el intervalo entre 30 y 35, correspondiente a un dictamen de poco capilar. En este caso, tal y como se apreció en el comportamiento a esfuerzos de compresión, las muestras que presentan un mejor comportamiento son aquellas con un porcentaje de adición de RCD del 70. Todos los bloques presentan una resistencia a la abrasión mayor de $2 \text{ cm}^2/g$, lo cual estipula la norma como necesario para ser catalogados como BSC 20. Tanto en los bloques con agregado convencional como en aquellos con RCD, a mayor porcentaje de adición de agregado mayor coeficiente de abrasión.

5 Conclusiones

El modelo productivo adoptado en la industria contemporánea, entre ellas la industria de la construcción, demanda un alto consumo de recursos y

produce una gran cantidad de residuos. El uso de materiales considerado residuos por la industria como materia prima de nuevos procesos, entre ellos la tierra y los residuos de construcción y demolición, contribuye a la disminución de los conceptos de extracción y residuo, atendiendo la problemática ambiental manifiesta en un consumo de recursos y una generación de residuos que está por encima de lo que el planeta puede generar y admitir.

Los bloques en tierra con adición de RCD presentaron mejores resultados que los bloques fabricados con agregado convencional, al respecto de sus propiedades mecánicas. Los bloques en tierra con adición de RCD cumplen con las especificaciones físicas y mecánicas establecidos por la Norma Técnica Colombiana para ser empleados en la construcción en usos para bloques de suelo-cemento correspondientes a los BSC 20 y BSC 40. Los bloques con un porcentaje de adición de arena convencional del 60 %, presentan la mayor resistencia a la compresión, adicionalmente son poco capilares y tiene buena resistencia a la abrasión. Alrededor de este porcentaje se obtienen las mejores propiedades mecánicas de los bloques con adición de agregado convencional.

De las diferentes dosificaciones estudiadas, los bloques con adición de RCD que presentan un mejor comportamiento son aquellos con un porcentaje de adición de agregado de 70 %. Con dicha dosificación soportan mayor esfuerzo a la compresión, presentan un coeficiente de capilaridad entre 30 y 35, y la resistencia a la abrasión supera el límite superior establecido por la NTC 5324, en promedio en un 400 por ciento.

Según la norma ASTM c34, la resistencia mínima que debe tener un bloque de arcilla para construir muros cargueros o estructurales, debe ser de 3,4 MPa; por lo tanto, en general, los bloques estabilizados con adición de RCD del 60 % y del 70 % se pueden emplear con estos fines en la construcción.

Los bloques de tierra son elaborados en la maquina CINVA-RAM. El accionamiento de esta máquina se hace manualmente, al igual que su calibración. La correcta calibración de la máquina, el correcto enrase, la forma de llenado del molde y la energía empleada en el accionamiento de la palanca, pueden incidir en las propiedades mecánicas de los bloques. Este puede ser un aspecto a evaluar en futuras investigaciones.

Referencias

- [1] R. Rodolfo, “Arquitectura de tierra contemporánea: tendencias y desafíos,” *Revista científica*, vol. 20, no. 2, pp. 342–382, 2007. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/apun/v20n2/v20n2a14> 198
- [2] S. Bestraten, E. Hormías, and A. Altemir, “Construcción con tierra en el siglo XXI,” *Informes de la Construcción*, vol. 63, no. 523, pp. 5–20, 2011. [Online]. Available: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewArticle/1248> 198
- [3] K. Heathcote, “The thermal performance of earth buildings,” *Informes de la Construcción*, vol. 63, no. 523, pp. 117–126, 2011. [Online]. Available: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1258/1343> 198
- [4] E. Basha, R. Hashim, H. Mahmud, and A. Muntohar, “Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement,” *Construction and Building Materials*, vol. 19, no. 6, pp. 448 – 453, 2005. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061804001734> 198
- [5] M. Blondet, J. Vargas, N. Tarque, and C. Iwaki, “Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la pontificia universidad católica del Perú,” *Informes de la Construcción*, vol. 63, no. 523, pp. 41–50, 2011. [Online]. Available: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1251/1336> 198
- [6] G. Viñuales, “Tecnología y construcción con tierra,” *Revista científica*, vol. 20, no. 2, pp. 220–231, 2007. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/apun/v20n2/v20n2a04.pdf> 198
- [7] A. von Mag and M. Rauch, “Paredes de tapial y su industrialización (encofrados y sistemas de compactación),” *Informes de la Construcción*, vol. 63, no. 523, pp. 35–40, 2011. [Online]. Available: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1250/1335> 198
- [8] C. Mileto, F. Vegas, and J. López, “Criterios y técnicas de intervención en tapia. la restauración de la torre bofilla de bétera (valencia),” *Informes de la Construcción*, vol. 63, no. 523, pp. 81–96, 2011. [Online]. Available: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1255/1340> 198
- [9] M. Rodríguez, I. Monteagudo, B. Saroza, P. Nolasco, and Y. Castro, “Aproximación a la patología presentada en las construcciones de tierra. algunas recomendaciones de intervención,” *Informes*

- de la Construcción*, vol. 63, no. 523, pp. 97–106, 2011. [Online]. Available: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1256/1341> 198
- [10] P. C. Salas, “Normas para el diseño y construcción con tierra,” in *Seminario Iberoamericana de Construcción con Tierra*, 2002. [Online]. Available: http://www.habitat.arq.una.py/ambitos/tyh/cct/crh_cct_0077.pdf 199
- [11] J. Cid, F. Mazarrón, and I. Cañas, “Las normativas de construcción con tierra en el mundo,” *Informes de la Construcción*, vol. 63, no. 523, pp. 159–169, 2011. [Online]. Available: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1262/1347> 199
- [12] K. Mukerji, *Soil Block Presses: Report on a Global Survey*, ser. Aus der Arbeit von GATE. German Appropriate Technology Exchange, 1986. [Online]. Available: <http://books.google.com.co/books?id=PceINAEACAAJ> 199
- [13] E. A. Adam, *Compressed stabilized earth blocks manufactured in Suda*. Graph O printing tranche for the UNESCO, 2001. [Online]. Available: <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001282/128236e.pdf> 199
- [14] A. B. Otero, F. J. Sandoval, and M. C. de Castro, “Comportamiento de bloques de tierra comprimida sometidos a diferentes condiciones de humedad,” in *II Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra*, no. 2, 2003. [Online]. Available: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3619854> 199
- [15] D.-G. Jaume, A. Fernández, L. C. Peñafiel, and J. Carlos, “Tecnologías para la fabricación de bloques de tierra de gran resistencia,” Ph.D. dissertation, Barcelona / Universitat Politècnica de Catalunya, Sept 2013. 199
- [16] G. Minke, *Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*, 3rd ed. Editorial Fin de siglo, 2008. 199
- [17] D. Meadows, D. Meadows, J. Randers, and W. Behrens, *The Limits to growth*. Universe Books, 1972. 200
- [18] W. Rees and M. Wackernagel, “Our ecological footprint: reducing human impact on the earth, La huella ecológica,” in *Ciudades para un futuro más sostenible*, no. 1, 2005. [Online]. Available: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n32/armor.html> 200
- [19] A. Vilches, D. G. Pérez, J. Toscano, and O. Macías, “Crecimiento económico y sostenibilidad,” 2009. [Online]. Available: <http://www.oei.es/decada/accion002.htm> 200

- [20] U. N. E. P. (UNEP), UNEP-Economics, and T. Branch, “Cities and green buildings: In the transition to a green economy, a unep brief,” 2009. [Online]. Available: <http://goo.gl/BHxKV1> 201
- [21] U. N. E. P. (UNEP), “Buildings and climate change: Status, challenges and opportunities,” 2009. [Online]. Available: <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DITx0916xPA-BuildingsClimate.pdf> 201
- [22] C. C. de la Construcción (Camacol), “Informe económico n°54, hacia la consolidación del sector edificador en colombia: Avances del año 2013 y desafíos para el 2014,” 2013. [Online]. Available: <http://goo.gl/CqTvRh> 201
- [23] W. G. B. C. WorldGBC, “Construction and world gbc to collect global green trends data to advance the sharing of green information and intelligence,” 2008. [Online]. Available: http://www.worldgbc.org/files/8613/6295/6420/World_Green_Building_Trends_SmartMarket_Report_2013.pdf 201
- [24] B. Edwards, *Guía básica de la sostenibilidad*. Gustavo Gili, 2001. 201
- [25] U. N. E. P. U. I. note, “Sustainable buildings and construction initiative,” 2011. [Online]. Available: http://www.unepsbci.org/SBCI_2006.pdf 201
- [26] U. N. E. P. U. S. of the United Nations Environment Programme (UNEP), “Sustainable building initiative (sbci) to the ad hoc working group on long-term cooperative action under the convention (awg-lca),” 2009. [Online]. Available: <http://unfccc.int/resource/docs/2009/smsn/igo/044.pdf> 201
- [27] M. I. R. Rojas, “Sostenibilidad de la explotación de materiales de construcción en el valle de aburrá,” Master’s thesis, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2008. [Online]. Available: http://www.bdigital.unal.edu.co/950/1/43207166_2009.pdf 203
- [28] C. M. Bedoya, “El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles,” Master’s thesis, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2003. [Online]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/3477/1/98589947-2003.pdf> 204
- [29] —, *Construcción sostenible: para volver al camino*. Biblioteca jurídica Diké, 2011. 204
- [30] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia, and U. de Antioquia AINSA, “Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos regional del Valle de Aburrá - PGIRS Regional: Diagnóstico,” Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Tech. Rep., 2001. 204, 205

- [31] S. de Investigación de la Construcción (SIC) Universidad EAFIT, “El aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición y su contribución a la sostenibilidad de las regiones,” 2009. [Online]. Available: <http://unfcc.int/resource/docs/2009/smsn/igo/044.pdf> 205
- [32] L. F. G. Baca, “Arquitectura en tierra. hacia la recuperación de una cultura constructiva,” *Apuntes*, vol. 20, no. 2, pp. 182–201, 2007. [Online]. Available: <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/revApuntesArq/article/view/8976> 206
- [33] J. T. Corral, “el suelo cemento como material de construcción,” *ciencia y sociedad*, vol. XXXIII, no. 4, pp. 520–571, 2008. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/pdf/870/87012672003.pdf> 206
- [34] J. Espuna, V. García, R. S. Roux, C. A. Fuentes, and Y. Aranda, “el suelo cemento como material de construcciónla arquitectura con tierra y su variabilidad de experiencias en construcción con tierra,” *Construcción con tierra*, no. 2, pp. 21–27, 2008. [Online]. Available: http://www.habitat.arq.una.py/ambitos/tyh/cct/crh_cct_0097.pdf 206
- [35] M. Blondet, G. Villa, and S. Brzev, “Construcciones de adobe resistentes a terremotos: Tutor,” Earthquake Engineering Research Institute, Tech. Rep., 2003. 208
- [36] *Modelo de ocupación territorial sostenible para el Valle de Aburra: Hacia una región de ciudades*, 2009. 208