

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA MINIMIZACION Y  
RECICLAJE DE LOS DESECHOS DE LA DEMOLICION Y COMPA-  
RACION DE SU APLICACION EN ALEMANIA Y PERU<sup>1</sup>

S. Valdivia, J. Hamidovic, M. Nicolai, M. Ruch, Th. Spengler, O. Rentz<sup>2</sup>

RESUMEN

Los desechos de demolición se tornan a nivel mundial un problema cada vez mayor, tanto en países desarrollados como en países en desarrollo, debido a los grandes volúmenes que se producen y a las tasas de reciclaje bajas aun en lugares con escasos recursos naturales.

La disposición de estos desechos contamina el ambiente, dejando un problema latente para las generaciones venideras, y ocasiona altos costos, especialmente en países desarrollados.

Para el reuso de estos desechos se ha desarrollado en la Universidad de Karlsruhe-Alemania un concepto integrado que incluye un análisis, tanto de procesos de desmantelamiento de edificaciones, como de técnicas de reciclaje de los desechos resultantes y de opciones de reuso de los materiales reciclados. Este concepto ha sido desarrollado por el Instituto Franco-Alemán de Investigación para el Medio Ambiente (IFARE) para una región franco-alemana

- 
1. Presentado en el Simposio Química y Medio Ambiente, realizado en la PUCP del 1 al 5 marzo, 1994.
  2. Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) Universität Karlsruhe Hertzstr. 16, W-7500 Karlsruhe 21, Germany

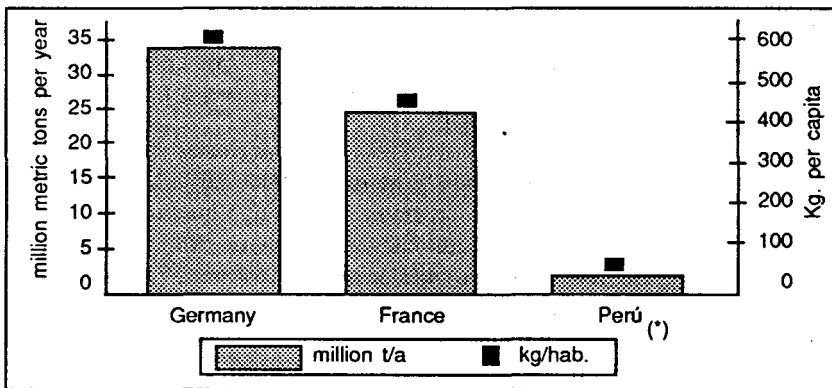
llamada "Rin-Superior" que abarca la región de Alsacia de Francia y Baden de Alemania.

El modelo desarrollado determinará las técnicas de desmantelamiento, demolición y de reciclaje, dependiendo de las opciones de reutilización de los desechos de la demolición. En este contexto se presentarán las opciones de reciclaje y se discutirán los factores que influyen en el incremento de los volúmenes reciclados.

Finalmente se analizará la posible aplicación de este modelo en dos escenarios diferentes: Baden-Alemania y Lima-Perú. Estos escenarios tienen realidades muy diferentes con valores de factores como mano de obra, disponibilidad de recursos naturales, técnicas de reciclaje disponibles, costos de disposición, etc. también diferentes. La aplicación del modelo en esos dos escenarios arrojará resultados variados que serán discutidos. Para terminar serán presentadas conclusiones derivadas de este trabajo.

## 1. INTRODUCCION

Los volúmenes de desechos de la construcción ascienden en Alemania a 34,1 [1] y en Francia a 25 [2] millones de toneladas métricas por año, los que están en la misma magnitud que los desechos municipales.



(\*) Este total se refiere a todos los desechos minerales inorgánicos registrados en las estadísticas sin distinguir sus fuentes de origen.

Figura 1: Total de desechos de la construcción producidos en Alemania, Francia y Perú (MTM/a)

Estos escombros son mezclas heterogéneas de materiales, que pueden llegar a ser clasificados como desechos peligrosos según los materiales que contengan (asbesto, brea, etc.).

Aunque los desechos de la demolición luego de un tratamiento, normalmente cumplen con los requerimientos técnicos exigidos a materiales convencionales de construcción, sus tasas de reciclaje en Alemania y Francia sólo llegan a ascender a 29% [1] y 11% [2], respectivamente. La tasa actual de Alemania es aún baja si se compara con la meta deseada para 1995, donde se aspira lograr una tasa de reciclaje de 60% [4].

Con respecto a las opciones de reciclaje para estos materiales reciclados, su reuso está limitado únicamente a la construcción de caminos o a su uso como materiales de relleno, por ejemplo, en la construcción de barreras de sonido, lo cual representa una desvaloración del reuso y con ello una desventaja desde el punto de vista económico.

Con el afán de proponer una solución íntegra a este problema, el instituto franco-alemán (Karlsruhe) ha desarrollado un modelo de desmontaje, demolición, reciclaje y reuso de materiales de construcción.

Este modelo está siendo aplicado en la región Baden-Alsacia, una región que representa a una sociedad industrializada con condiciones relativamente favorables para el planeamiento, que cuenta con una economía estable, con leyes ambientales y donde las técnicas de reciclaje están disponibles. También se está comenzando a validar su aplicación en otros escenarios substancialmente diferentes, como es el existente en la ciudad de Lima.

## 2. DESCRIPCION DEL MODELO DE DESMANTELAMIENTO/DEMOLICION Y RECICLAJE DE LOS DESECHOS DE LA DEMOLICION

El modelo consta de tres módulos:

- el módulo de ingreso (Input), donde la información requerida es ingresada,
- el módulo de optimización, donde la información es procesada y
- el módulo de salida (Output), donde los resultados son presentados.

## **Módulo de Ingreso (Input)**

En este módulo hay dos grupos de información a ser considerados:

El primer grupo contiene información concreta sobre la edificación, como materiales usados en su construcción y las relaciones de precedencia del desmantelamiento de las partes. De esta forma, por ejemplo, se determinará la cantidad de cables eléctricos (mt) usados en la casa y el método y secuencia de su desmantelamiento.

El resultado de este primer análisis es un **gráfico de precedencia** de los elementos de construcción y sus respectivos costos de desmantelamiento y demolición.

El segundo grupo reúne información relacionada al reciclaje, tal como las técnicas de separación y reciclaje, y las opciones de reuso de los productos finales. La información reunida debe incluir datos sobre costos, precios y capacidades de reciclaje y reuso en la región. El resultado de este segundo análisis es la determinación de **funciones de costos del reciclaje** para cada elemento de construcción reciclado en cada opción de reuso.

## **Modelo de Optimización**

Basada en la información ingresada en la primera parte, la optimización del problema se reduce a lo siguiente:

Minimizar los costos totales de desmantelamiento, separación, reciclaje y transporte sujeto a las siguientes restricciones:

- calidad requerida
- compatibilidad ambiental requerida
- técnicas disponibles
- límites de capacidad de tratamiento

Debido a la complejidad del problema de planeamiento para la región del Rin-Superior y a la gran cantidad de información a ser manejada, ha sido necesaria la formulación de un modelo de investigación de operaciones e implementación de éste en una computadora personal. Los métodos de solución empleados se basan en modelos de optimización de investigación de operaciones, como la programación lineal y programación de números enteros.

## Salida (Output)

Con la ayuda de este modelo serán obtenidos los siguientes resultados para la región Rin-Superior:

- estrategias óptimas de desmantelamiento
- cantidad y composición de los desechos resultantes,
- reasignamiento de los diferentes materiales a las técnicas de reciclaje correspondientes y a sus opciones de reuso, e
- identificación de los materiales no reusables.

La figura 2 muestra la estructura integrada del sistema de desmantelamiento y reciclaje que ha sido desarrollada:

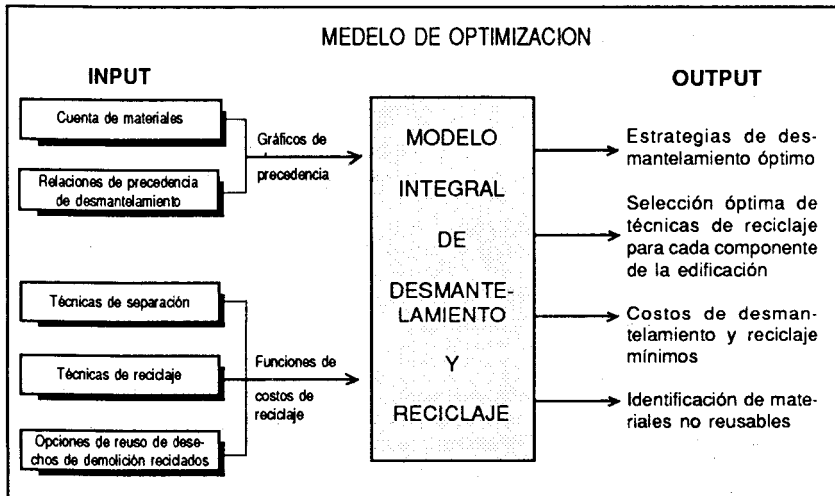


Figura 2. Estructura del modelo integral de desmantelamiento y reciclaje

Los análisis de sensibilidad se pueden realizar considerando variaciones en parámetros del modelo, tales como:

- tipo y número de edificaciones,
- distancias a transportar los materiales,
- técnicas de reciclaje disponibles,
- estándares ambientales determinados por los gobiernos, e
- instrumentos económicos ambientales, como impuestos a los desechos.

### 3. OPCIONES DE REUSO DE MATERIALES RECICLADOS

Materiales tan variados como el vidrio, plásticos, metales ferrosos, metales no ferrosos y fracciones minerales están contenidos en estos desechos, pero, en el caso de edificaciones alemanas y francesas, las partes minerales representan el volumen más grande llegando hasta un 80% y en algunos casos más. Por esta razón la atención se ha concentrado en estos materiales.

Las fracciones minerales contienen concreto, grava, piedras, arena, ladrillos, arcilla, yeso, etc. Las opciones de utilización de estos residuos están reunidas en tres grupos: construcción de edificaciones, construcción de carreteras y aplicaciones no convencionales, como el uso de éstos como relleno en minas abandonadas o como material para construir muelles en la costa.

Una revisión de estas opciones de reuso se dan en la figura 3.

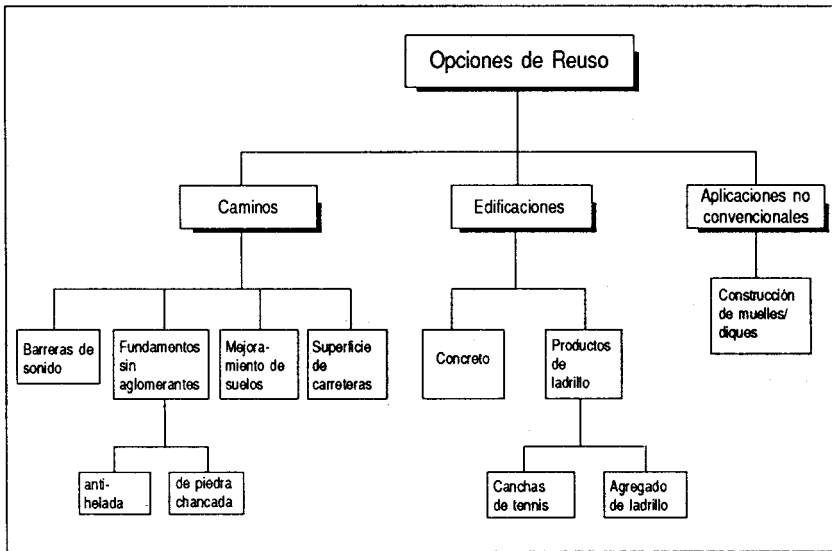


Figura 3. Opciones de reuso para materiales reciclados [6]

Alrededor de un 90% del volumen reciclado se da en la construcción de caminos y carreteras, específicamente en fundamentos sin aglomerantes, donde los materiales tienen requerimientos de calidad más bajos.

La calidad y la compatibilidad con el ambiente son criterios importantes que determinan el reuso de estos materiales. Por lo general estos materiales reciclados contienen cierto porcentaje de impurezas que los excluye de ser usados en opciones como aditivo del concreto. Impurezas como los cloruros en el concreto contribuyen, por ejemplo, a la corrosión del acero en las construcciones.

Otro criterio importante que determina el reuso es el económico. El cliente se decide por el producto de menor precio que garantice una mínima calidad. Como este producto es sensible a los costos de transporte, la relación de precios puede variar en 40 kilómetros a la redonda y el mismo producto puede tener un precio atractivo para unos y caro para otros. En Alemania se estima que dentro de un radio de 30 a 50 km [8], los costos de transporte de estos materiales no afectan grandemente los costos totales del producto.

Con esto se concluye que el problema del reciclaje y de su reuso se regionaliza, es decir que para una zona con recursos nulos de materiales de construcción, la instalación de una planta recicladora puede ser rentable.

#### 4. TECNOLOGIAS DISPONIBLES PARA RECICLAR LOS ESCOMBROS

Las plantas recicladoras convierten los restos de demolición en fracciones minerales de la misma calidad de la piedra y grava común que se comercializa.

Las principales propiedades de los productos a considerar en el tratamiento son: el tamaño de grano, la composición y el grado de impureza.

Las principales unidades de operación del reciclaje son la del separado manual (de objetos ajenos a los escombros, como llantas, madera, etc.), separado magnético (aquí se separan metales), chancado, cribado, cernido y bandas hidráulicas.

Las plantas recicladoras se pueden dividir en plantas móviles y estacionarias. Las primeras son usadas preferentemente en la construcción de carreteras donde los materiales reciclados se pueden reutilizar in situ.

En el desarrollo de este modelo se diseñan plantas estacionarias, las cuales se prefirieron principalmente debido a que la calidad obtenida por éstas es mejor.

## 5. FACTORES VARIABLES EN LA APLICACION DEL MODELO

Para este estudio se analizará el módulo de Input de técnicas de reciclaje y de opciones de reuso que determinará las funciones de costos de reciclaje. Los costos de reciclaje se referirán únicamente a los costos de producción.

Los factores que varían en los diferentes escenarios son los siguientes:

1. Costos de mano de obra obrera (por hora). Mientras que en Alemania es de 18,8\$ por hora, en Francia lo es de \$15 y en Perú, de menos de \$1.
2. Disponibilidad de recursos naturales como grava, piedra y arena. En zonas con grandes recursos naturales minerales, los costos de éstos son por lo general bastante bajos. Mientras que en Alemania una tonelada de piedra chancada cuesta 12\$, en Francia cuesta 10\$ (sin incluir los costos de transporte).
3. Capacidad del relleno sanitario. En las grandes metrópolis la capacidad de los rellenos tiende a ser nula y es necesario transportar estos desechos grandes distancias, lo cual incrementa los costos del responsable de los residuos. En estas ciudades el reciclaje de escombros se torna una alternativa interesante para las empresas de construcción, que de igual forma deben trasladar sus insumos (piedras y arena) de lugares también lejanos para sus obras de construcción.
4. Existencia de leyes ambientales. Estas leyes determinan la obligatoriedad de lo siguiente:
  - que los residuos se depositen en un depósito autorizado o sea enviado a una planta de reciclaje, pero que no sea abandonado en las calles.
  - que los materiales reciclados se reusen sólo si hay un certificado que denote que éstos no representarán daño a la naturaleza.

Es necesario un nivel de exigencia mínimo, si se desea regular la conducta de los responsables de estos residuos y con ello garantizar la posible aplicación de este modelo.



## 6. ANALISIS DE LA SENSIBILIDAD DE LOS COSTOS DE RECICLAJE EN 2 ESCENARIOS DIFERENTES

En la siguiente figura se muestra un análisis de sensibilidad de las funciones de costos, donde dos plantas estacionarias diferentes (una simple y otra más compleja) bajo condiciones diferentes (Alemania y Perú) son analizadas.

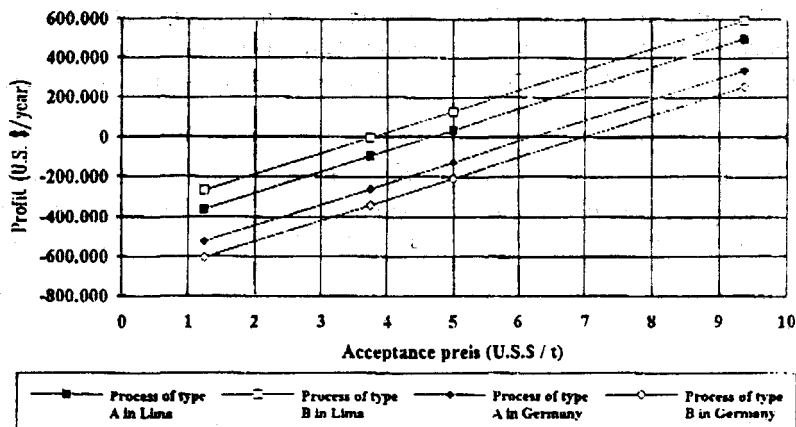


Figura 4. Sensibilidad de los costos de reciclaje en escenarios diferentes

donde:

A significa proceso de producción simple y

B significa proceso de producción más avanzado

Acceptance preis se refiere al monto que recibiría la planta recicladora por cada tonelada ingresada para ser tratada (Ingreso).

Las plantas analizadas tienen una capacidad de procesamiento de 110 000 toneladas métricas por año y sus correspondientes inversiones ascienden a 1,68 millones de U.S.\$ para el proceso de tipo A, y 2,27 millones de U.S.\$ para el proceso de tipo B.

El precio promedio considerado para los productos resultantes del proceso tipo A es de 1,75 \$/T y para el tipo B es de 5,9 \$/T. Los productos finales son grava, piedra y arena principalmente, que tienen una calidad comparable a los materiales minerales de construcción usados en la construcción de carreteras.

En Lima, la planta recicladora puede lograr una ganancia, es decir, cubrir los costos, si por aceptar tratar estos desechos en sus instalaciones cobra montos mínimos de 3,8 a 4,7\$/T. Si el responsable de estos residuos se vé obligado a depositar adecuadamente sus residuos en un relleno sanitario (el cual quedará fuera de la ciudad) y según un presupuesto por cada tonelada trasladada el transportista le cobra 4T, luego al responsable le convendría pagar esa cuota mínima de 3,8H/T ahorrando así 20 centavos por tonelada.

Aunque el reciclaje en Lima parecería ser ventajoso, la realidad es que las autoridades no controlan efectivamente la disposición de estos desechos. Así los costos finales para los responsables ascienden a menos de 3,8\$/T.

En Alemania este cobro tiende de 6,3 a 7\$/T (mayor que en Lima). Este monto en Alemania es relativamente bajo y alienta a muchas constructoras a dejar sus residuos en la planta recicladora, pues el depositarlo en el relleno implica además de los costos de transporte, 50\$ extras por cada tonelada depositada.

## CONCLUSIONES

La aplicación de este modelo bajo diferentes escenarios es posible tomando bajo consideración diferentes valores de parámetros, como precios de materias primas que serían reemplazadas por los materiales reciclados, costos de mano de obra, costos de depósito en un relleno, etc.

El análisis del módulo de Input referido a informaciones sobre los materiales usados en la construcción, así como información técnica sobre las secuencias de desmantelamiento, deja de ser relevante en sociedades como la del Perú, donde los costos de desmantelamiento son nulos y es que cada material, que en sociedades industrializadas puede tener un valor nulo (como los cables, alfombras usadas, piezas de madera, etc), tiene un valor alto para los sectores de más bajos ingresos. Estos son desmantelados gratuitamente.

Con respecto a las opciones de reuso, éstas son las mismas en diferentes escenarios: construcción de carreteras y aplicaciones no convencionales con ligeras variaciones dependiendo de las características regionales, como el uso en la construcción de muelles costeros o barreras de sonido.

Los resultados iniciales en Alemania muestran que la aplicación del desmantelamiento de las edificaciones en vez de la demolición total conven-

cional incrementa el reciclaje y reduce los costos. En un caso concreto se desmanteló un hotel en la región y se redujeron los costos totales en 20% y se logró reciclar hasta 94% de toda la casa (incluyendo vidrio, madera, metales, ladrillos, etc.). Por otro lado las plantas recicladoras también obtienen beneficios, pero solamente gracias al cobro por cada tonelada ingresada a sus instalaciones.

En sociedades menos desarrolladas los costos de reciclaje son menores, especialmente debido a la mano de obra barata y al desmantelamiento a costo cero.

Por ejemplo en Lima se alcanza un beneficio si existe un cobro de 3,8 a 4,7 \$/T y si los productos son vendidos de 1,7 a 5,9 \$/T.

Lamentablemente no existen normas estrictas que regulen la conducta de los responsables de los residuos y que cree las condiciones propicias para actividades del reciclaje.

No se llegan a conclusiones concretas para la aplicación de este modelo en diferentes escenarios. Cada caso debe ser considerado y evaluado por separado; este modelo es altamente sensible y los resultados varían grandemente de caso a caso, generando resultados interesantes sobre los procesos de desmantelamiento, técnicas de reciclaje y opciones de reuso.

## BIBLIOGRAFIA

1. Gallenkemper, B.; Regener, D.; "Emissionsarmer Einsatz von Bauschutt, Straßenaufbruch und Rost- und Kesselasche aus der Müllverbrennung (alemán: Reuso de escombros de la construcción, de carreteras y cenizas de la incineración de residuos con bajas emisiones contaminantes)", Endbericht zum Forschungsvorhaben; FH Münster, 1992.
2. Union Nationale des Producteurs de Granulats; "Les Matériaux de Demolition en France -Le Recyclage de la Fraction Inerte (francés: Los materiales de la demolición en Francia- el reciclaje de la fracción inerte)", SNPGR:UNPG; 3, rue Alfred Roll - France 1991.
3. Muñoz, M; "Estudio Sectorial de Residuos Sólidos del Perú"; DITESA/ OPS, Lima - Perú 1990.
4. Entwurf (Bosquejo); "Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland: Zielfestlegungen zur Vermeidung, Verringerung und Verwertung von Bauschutt, Baustellenabfällen, Erdaushub und Straßenaufbruch (alemán:

- Gobierno de la República Federal Alemana: Metas y objetivos para el evitamiento, disminución y reuso de escombros)" Bonn - 1991.
5. Spengler, Th.; Hamidovic, J.; Nicolai, M.; Ruch, M.; Valdivia, S.; Rentz, O.; "Planungssystem zur optimalen Demontage- und Verwertungsplanung von Wohngebäuden im Oberrheingraben (alemán: Sistema de planeamiento hacia un planeamiento de demontaje óptimo y de reuso de edificaciones en el Rin Superior)", in: proc. Informatik im Umweltschutz, 7 Symposium, Ulm 1993, Springer Verlag, 1993.
  6. M. Nicolai, Th. Spengler, M. Ruch, S. Valdivia, J. Hamidovic and Rentz "Minimization, Recycling and Reuse of Demolition Waste – A Dismantling and International Recycling and Recycling Planning System for the Region of the Upper Rhine valley"; International Recycling Congress at the Re '93 Trade Fair Geneva - Switzerland, 1993.
  7. Jöhn Norton; "Building with Earth- A Handbook"; Intermediate Technology Development Group, United Kingdom - 1986.
  8. Guntram Kohler; "Recyclingpraxis Baustoffe (alemán: Práctica del reciclaje de materiales de la construcción)"; Verlag TUV Rheinland, Köln - Germany - 1991.