

## SIMULACIÓN DE LA DEMANDA DE SUELO URBANO EN LA CIUDAD DE LA PAZ

Simulation of the demand for urban land in the city of La Paz

Lic. Rosa Flores, univ. Edwin Arquipino, univ. Juan Carlos Estrada, univ. Victor Hugo Quispe

rfloresmorales@gmail.com , edwin.arq@gmail.com, estradajuanky@gmail.com, vicosoas@gmail.com

### RESUMEN

"La conquista conceptual de la realidad comienza, lo que parece paradójico, por idealizaciones" (Bunge, 1972). El trazo de mundos ideales implica la construcción de modelos que nos acercarán al entendimiento de la realidad.

En este artículo se presentan dos modelos de crecimiento urbano de la ciudad de La Paz. Uno de ellos basado en la Dinámica de Sistemas y variables sociodemográficas, cuya simulación permite estimar el incremento porcentual de la demanda de suelo urbano al año horizonte 2040. Este modelo fue calibrado con información censal de los años 1989 y 2001. El segundo modelo representa mediante Autómatas Celulares y variables geográficas de vecindad, el crecimiento de la mancha urbana. Los resultados de la simulación permiten identificar las zonas aledañas, con mayor probabilidad de urbanización.

Los resultados hallados por ambos modelos son satisfactorios y demuestran su utilidad para procesos de planificación urbana.

### Palabras clave:

Dinámica de sistemas; autómatas celulares; simulación urbana; crecimiento urbano

### ABSTRACT

"The conceptual conquest of reality begins, by idealizations, which seems paradoxical" (Bunge, 1972). The outline of ideal worlds implies the construction of models that will bring us closer to the understanding of reality.

In this article we show two urban growth models of La Paz city. One of them is based in systems dynamics and sociodemographic variables, which simulated allow us to estimate the percentage increment of urban land demand forward to 2040. The model was calibrated with census information from 1989 and 2001. The second model represents the growth of urban land by cellular automata and geographic neighbor variables. The simulation results point the most probable zones to be urbanized.

Both models have shown satisfactory results and their usefulness in urban planning processes.

### keywords:

System dynamics, cellular automata, urban simulation, urban growth

### INTRODUCCIÓN

En Bolivia ha existido un crecimiento urbano vertiginoso en la segunda mitad del siglo XX,

fenómeno concentrado en las ciudades del eje troncal, entre ellas la ciudad de La Paz. Para el año 1920, vivían en ella alrededor de una cuarta parte (24%) del total de habitantes urbanos residentes en el territorio boliviano. En la actualidad la metrópoli cuenta con una población cercana a un millón. Esta tendencia de crecimiento urbano no fue prevista ni planificada, generando recurrentes problemas de uso de suelos por el avasallamiento del flujo migratorio campo-ciudad, una demanda alta de vivienda, problemas viales y demanda de servicios públicos, entre otros.

La ciudad de La Paz presenta condiciones naturales muy complejas por su configuración geológica, geotécnica y topografía de alta pendiente, por ella pasan al menos 325 ríos y riachuelos, razones por las que se constituye en una urbe de las más difíciles en cuanto al mantenimiento y preservación de su infraestructura urbana, pues está, y ha estado sometida a una infinidad de riesgos naturales como deslizamientos, derrumbes, etc. que año tras año castigan, especialmente y con mayor intensidad, a los barrios periféricos que se han desarrollado en pendientes inestables y donde se han originado últimamente remociones de grandes masas de tierra, como en las zonas de Kupini, Villa Salomé, Retamani y Huanu Huanuni en Bella Vista (Bustillos, 2010). Estos riesgos naturales son incrementados por asentamientos urbanos no autorizados, agravando y empeorando de esta manera las condiciones de inestabilidad geológica.

Este conjunto de situaciones dificulta la tarea de los planificadores y administradores de la ciudad, por ello la necesidad imperiosa de generar modelos de análisis alternativos, los cuales sean capaces de anticipar y pronosticar esta realidad compleja a fin de planificar estrategias de mantenimiento y crecimiento urbano.

Según estudios de ONU-Habitat (2012) "América Latina y el Caribe es una región fundamentalmente urbana, aunque cuenta con grandes espacios poco poblados. Casi el 80% de su población vive actualmente en ciudades, una proporción superior incluso a

la del grupo de países más desarrollados, por lo que la región está considerada como la más urbanizada del mundo. En América Latina y el Caribe, la urbanización fue muy acelerada entre 1950 y 1990. La región pasó de tener 40% de la población residiendo en ciudades al inicio de ese periodo, a 70% cuarenta años después. A partir de los años noventa, la proporción de población urbana siguió aumentando, pero de una manera progresivamente más lenta. Las proyecciones indican que esa desaceleración continuará en el futuro y que la proporción de población urbana se acercará al 90% hacia el 2050". Estas aglomeraciones urbanas conllevan muchos problemas a su vez, como asentamientos, tráfico, basura, demanda de servicios públicos, etc.

La ciudad de La Paz no se encuentra ajena a esta problemática mundial. Las autoridades locales de la ciudad preocupadas por el futuro ante el crecimiento sostenido de la urbe, vienen proyectando la nueva ciudad metropolitana con el proyecto denominado "La Paz 2040", donde se propone organizar el servicio de transporte público más eficiente, ensanchamiento de calles, construcción de áreas públicas, ordenamiento territorial, crecimiento de viviendas, etc. Para este efecto es prioritaria la explotación y análisis de los datos disponibles que reflejan la dinámica urbana propia de la ciudad de La Paz para una adecuada planificación.

Los estudios demográficos advierten que las ciudades crecerán aun más, se indica que China va a construir 300 ciudades nuevas en los próximos 20 años, no será el mismo caso de Bolivia, pero es un hecho que la ciudad de La Paz seguirá creciendo y crecerá fuera de la mancha urbana donde, por el momento, se desconoce la calidad del suelo como para categorizarlas en zonas con potencial urbano, zonas con probabilidad de edificación o zonas no aptas para su urbanización. Actualmente el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP) ha realizado estudios en cada una de las zonas a fin de identificar el tipo de riesgo según la composición geológica del lugar, logrando

publicar en marzo del presente año un Mapa de Riesgos donde se puede advertir zonas susceptibles a deslizamientos, zonas seguras, zonas inestables, etc. Todo este estudio se enmarca en la mancha urbana actual, pero se desconoce esta información de las zonas aledañas a la urbe.

En los últimos años se ha podido advertir varios estudios realizados sobre las dinámicas urbanas. En 1969 se publica el libro *Urban Dynamics* (Forrester, *Urban dynamics*, 1969), en la que se muestra la aplicación de la Dinámica de Sistemas a los estudios urbanos. La estructura del modelo mostró cómo la industria, el hogar y la gente interactúan entre sí a medida que la ciudad crece. El estudio permitió analizar las urbes desde los laboratorios, donde se pudo advertir la conveniencia de adoptar algunas políticas públicas como el caso de la ciudad de Boston. Por otro lado, Tobler (1979) fue el primero en proponer un modelo geográfico basado en Autómatas Celulares (AC), Roger White construyó un AC con la finalidad de reproducir la estructura espacial que presentan los usos de suelo en una ciudad (White & Engelen, 1997), Aguilera (2006) presentó dos modelos de predicción del crecimiento urbano elaborados para el área Metropolitana de Granada, uno de ellos con el empleo de AC. Hoy en día podemos encontrar innumerables artículos referidos al estudio de la dinámica urbana, de ciudades importantes, mediante el uso de DS y AC demostrando un interés a nivel internacional por estudiar las dinámicas urbanas; a la par se han desarrollado herramientas de software que posibilitan la implementación de estos modelos facilitando su integración con bases de datos geográficas.

Considerando lo expuesto, el presente proyecto tomó por objetivo modelar la demanda de suelo urbano de la ciudad de La Paz desde el enfoque de la Dinámica de Sistemas (DS) y Autómatas Celulares (AC) y simular su comportamiento a futuro para corroborar los siguientes supuestos:

- La simulación del crecimiento urbano de la ciudad de La Paz, basado en

factores motrices como las variables sociodemográficas permiten calcular el tamaño porcentual de la demanda de suelo urbano.

- Las variables geográficas de distancia, proximidad y la topografía del relieve terrestre, identifican, de forma orientativa, las zonas más probables de expansión de la mancha urbana de la ciudad de La Paz.

Es evidente la necesidad de crear teorías respecto a las ciudades o de generar mayor información de la dinámica urbana y formulación de nuevas teorías relacionadas entre factores geográficos y crecimiento urbano; conocimiento que permitirá el pronóstico y la planificación de las urbes.

La novedad y aporte del proyecto se presenta desde muchas perspectivas: elaborar un trabajo de simulación con datos del municipio implica mucho aprendizaje por la magnitud del trabajo y, al mismo tiempo, permite generar modelos propios que coadyuven a la planificación de la urbe en estudio; desde la perspectiva tecnológica, se insertará en la esfera de las direcciones del municipio, herramientas que permitan tomar decisiones con mayor conocimiento de la dinámica y las tendencias urbanas propias de la ciudad de La Paz; finalmente el proyecto tiene un alto impacto porque provee de información y de escenarios futuros que orienten a la toma de decisiones en la planificación de la ciudad, en la expansión que exigen los flujos migratorios y el crecimiento poblacional.

Las representaciones halladas tienen el propósito de coadyuvar con la planificación al constituirse en escenarios posibles pero, en ningún caso, deberán considerarse como realidades futuras; por lo que esta investigación adopta un enfoque exploratorio

## MÉTODOS

No existen métodos que permitan medir con exactitud la importancia de los factores que intervienen en el crecimiento de urbes por lo que es difícil y complejo evaluar el papel que juega cada uno de ellos.

En esta dinámica intervienen factores socioeconómicos, políticos, físicos, topográficos, por mencionar algunos. En el presente trabajo se consideraron variables demográficas y socioeconómicas obtenidas de los registros históricos de los censos de población y vivienda 1992 y 2001 del Instituto Nacional de Estadística (Instituto Nacional de Estadística) al igual que la información contenida en el "Dossier Estadístico" del GAMLP (2005). La fuente principal de información cartográfica fue la composición de mapas USPA (Usos del Suelo y Patrones de Asentamiento), proporcionado por el departamento de Ordenamiento Territorial del GAMLP, de donde se extrajeron las capas temáticas como el mapa de vías, equipamiento urbano, áreas verdes, áreas

protegidas, áreas residenciales, etc., a estos datos se adicionó el Modelo Digital de Elevaciones que proporciona las pendientes del terreno en estudio y fotografías aéreas de la ciudad.

### Modelo con DS

El modelo hallado bajo el enfoque de la DS fue elaborado en base a las variables sociodemográficas consideradas como factores motrices del crecimiento (tabla 1). Sin embargo, muchas variables no fueron consideradas por no tener información registrada en los periodos de estudio o, porque las dos fuentes consultadas trabajaron con distribuciones territoriales diferentes.

Variable	Nombre	Descripción	Unids.	Tipo Variab	Tipo mod.
POB	Población	Población	Pers.	Prim	Nivel
HOG	Hogares	Hogares	Nº hog	Prim	Nivel
SR	Suelo residencial	Suelo residencial	Ha	Prim	Nivel
NV	Número de viviendas	Número de viviendas	Nº viv	Prim	Nivel
AV	Área Verde	Área verde	Ha	Prim	Nivel
TBN	Tasa Natalidad	Tasa natalidad por 1000	Adim.	Prim	Tasa
TBM	Tasa Mortalidad	Tasa mort. por 1000	Adim.	Prim	Tasa
TSM	Tasa Migratoria	Tasa migratoria por 1000	Adim.	Prim	Tasa
Nac	Nacimientos	Obtenidos a partir del TBN	Nºnac.	Deriv	Flujo
Def	Defunciones	Obtenidos a partir del TBM	Nº def.	Deriv	Flujo
SM	Saldo Migratorio	Saldo migratorio	Nºpers.	Deriv	Flujo
IncPOB	Aumento de la pobl.	Incremento de población	Nº pers.	Deriv	V. Aux
PH	Personas por hogar	Personas por hogar 1992	Nº pers.	Deriv	Tasa
HCE	Hogares por cambio de estructura.	Hogares por cambio de estructura	Nº hog	Deriv	Tasa
NH	Nuevos hogares	HCE por increm. Pobl.	Nºhog/a	Deriv	Flujo
NViv	Nuevas viviendas	Nuevas viviendas	Nº viv	Deriv	Flujo
NSR	Nuevo suelo residencial	Nuevo suelo residencial	Ha	Deriv	V. Aux
CMCT	Costo metro cuadrado de terreno	Costo metro cuadrado de terreno	\$us.	Deriv	Flujo

Tabla 1. Variables empleadas en el modelo y sus principales características

El diseño conceptual del modelo se basó en la propuesta de Aguilera (Aguilera, Plata, Bosque, & Gómez, 2009) el mismo que se compone de cinco bloques: tres básicos y dos derivados.

El primer bloque se encarga de estimar la evolución de la población en función de las tasas de natalidad, mortalidad y migración. El segundo bloque aborda la modificación del número de hogares, producto de los cambios en la estructura familiar así como la evolución poblacional. El tercer bloque básico estima la evolución de los niveles de renta.

Como producto de la relación entre estos bloques se adicionan dos bloques. Un

bloque de estimación de número de viviendas y superficie urbana destinada a usos residenciales, como producto de la relación entre los bloques de evolución de los hogares y de evolución de niveles de renta. Un bloque de estimación de las superficies urbanas destinadas a usos de áreas verdes a partir del incremento poblacional.

Luego del análisis de todas las variables primarias, derivadas y de calibración e integrándolas mediante la relación de causa – efecto, se obtuvo el modelo general implementado en el programa Stella versión 9.3 (ver figura 1).

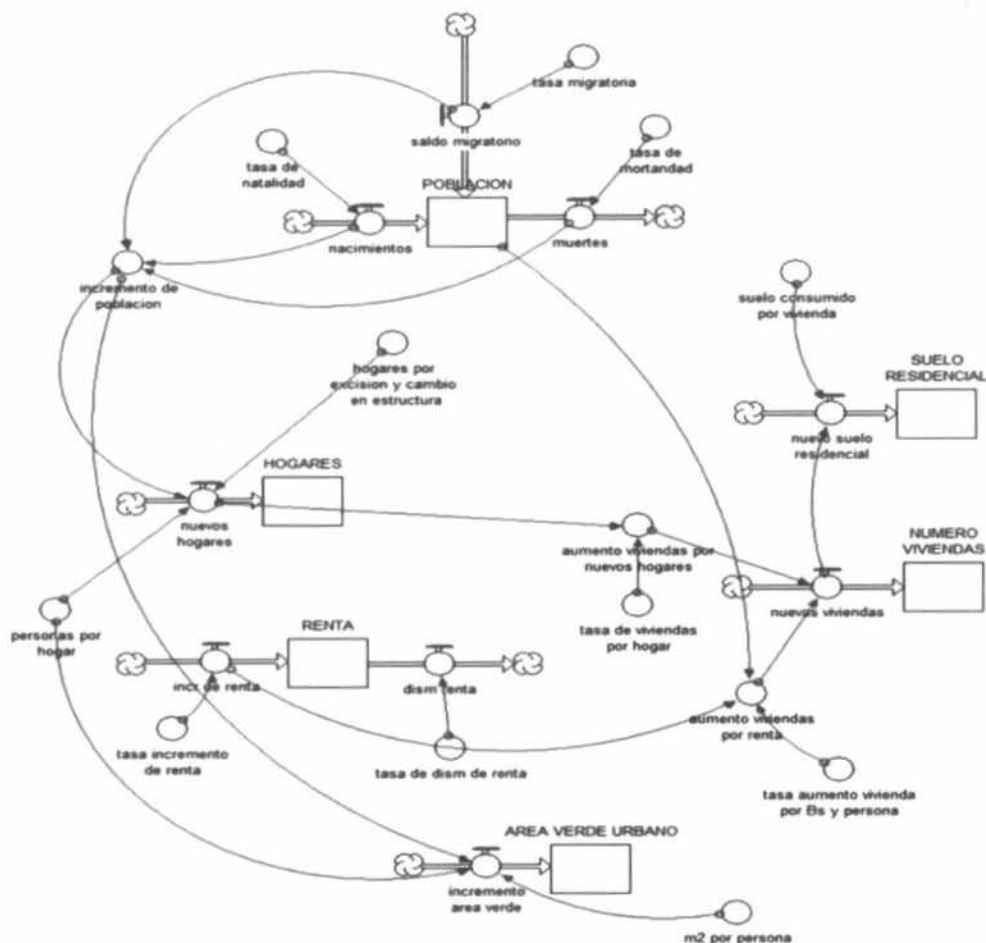


Figura 1. Modelo Propuesto de Crecimiento Urbano de la Ciudad de La Paz

Considerando que la dinámica urbana es similar en cada uno de los siete macrodistritos que componen la ciudad de La Paz, con la diferencia de los datos que explican su comportamiento, se ha replicado el modelo general, para cada uno de los ellos.

Los modelos de DS implican un conjunto de ecuaciones algebraicas que expresan la relación entre las variables intervinientes. En este caso las ecuaciones de cada bloque son descritas a continuación.

**Estimación de la evolución poblacional:**

Los primeros bloques del modelo representan la evolución de la población. Este obtiene los crecimientos poblacionales a lo largo del tiempo mediante la estimación de nacimientos, muertes y migración, empleando para ello las tasas de natalidad, mortalidad y migratoria.

El número de habitantes nacidos por año está dada por la tasa de natalidad (TN), mediante la Ec 1.

$$TN=N/P*1000=> N=(P*TN)/1000 \quad (1)$$

Donde:

- TN = tasa de natalidad
- N = número de nacimientos por año
- P = Población total promedio por año

El número de defunciones por año está dado por la tasa de mortalidad (TM), calculada mediante la Ec 2.

$$TM=M/P*1000=> M=(P*TM)/1000 \quad (2)$$

Donde:

- TM = tasa bruta de mortalidad
- M = número de muertes por año
- P = Población total promedio por año

El número de habitantes que migran por año está dado por la tasa de migración (TMi), calculada por la Ec 3.

$$TMi=SM/P*1000=> SM=(P*TMi)/1000 \quad (3)$$

Donde:

- TMi = tasa de migración
- SM = Saldo migratorio
- P = Población total promedio

Considerando los valores anteriores, la variable población será calculada por la siguiente ecuación Ec 4:

$$POBLACIÓN= \\ \text{Nacimientos-Muertes-Saldo Migratorio} \\ (4)$$

La estimación del incremento de población, que será almacenado a través de la variable auxiliar Incremento de población está dada por la Ec 5.

$$\text{Incremento de población} \\ =\text{nacimientos-saldo\_migratorio-muertes} \\ (5)$$

**Estimación de la evolución de los hogares:**

El segundo bloque del modelo estima el cambio en el número de hogares con el tiempo. El número de nuevos hogares es una consecuencia del crecimiento poblacional estimado en el primer bloque. Para ello se divide el incremento poblacional entre el número de personas por hogar. Igualmente se considera como factor de incremento del número de hogares la aparición de nuevos hogares generados por el cambio de estructura, calculado a partir de los nuevos hogares aparecidos en el periodo 1992 al 2001, no se explican de acuerdo con el crecimiento poblacional, sino con una disminución del número de personas por hogar. El número de nuevos hogares se obtiene como la suma de los nuevos hogares producto del incremento poblacional, así como de los nuevos hogares por escisión de los existentes.

El número de nuevos hogares por año está dado por el incremento de población por

año, las personas por hogar y los hogares por escisión y cambio en estructura, mediante la Ec 6:

$$NH=(IncPob/PH)-HCE \quad (6)$$

Donde:

NH = Nuevos Hogares

IncPob= Incremento de población por año

PH = Número de personas por hogar

HCE = Hogares por cambio de estructura

### Estimación de la evolución de los niveles de renta

El tercer bloque estima el cambio de los valores de renta (Ec 9) a partir del flujo del incremento de renta (Ec 7) y la disminución de renta (Ec 8).

$$IR=tasa\ inc.renta*100 \quad (7)$$

$$DR=tasa\ dism.renta*100 \quad (8)$$

Donde:

IR = incremento de renta

tasa inc. Rent = tasa incremento de renta

tasa de dism. renta = tasa disminución de renta

DR = disminución de renta

$$RENTA=$$

$$\text{incremento de renta-disminución de renta} \quad (9)$$

### Estimación de la evolución de las viviendas y el suelo residencial:

El bloque de evolución de las viviendas y ocupación de suelo se apoya en los diferentes bloques básicos detallados anteriormente. Para ello se estima el incremento de nuevas viviendas a partir de los procesos: incremento de viviendas motivado por el incremento de hogares, así como el incremento de viviendas con motivo del incremento de renta (ver Figura 1).

La determinación del número de viviendas generadas por los nuevos hogares se apoyará en la estimación del número de hogares calculado en el segundo bloque

junto con la tasa de viviendas por hogar, que en principio se fija de acuerdo con los valores existentes en 1992; así como en el número de viviendas generadas por el incremento de renta.

A partir de la estimación de las viviendas, y mediante un valor de suelo consumido por vivienda se puede obtener igualmente las nuevas demandas de suelo para uso residencial.

### Evolución de Número de Viviendas:

El número de nuevas viviendas por año (Ec 12) está dado por el incremento de viviendas por nuevos hogares (Ec 10) y por el incremento viviendas por renta (Ec 11)

$$AVPNH=NH*TVPH \quad (10)$$

Donde:

AVPNH = Aumento de viviendas por nuevos hogares  
(variable auxiliar)

NH = Número de nuevos hogares

TVPH = Tasa de viviendas por hogar

$$VPR=(P/TAVBP)-IR \quad (11)$$

Donde:

AVPR = Aumento de viviendas por renta

P = Población total promedio

TAVBP = Tasa de aumento vivienda por Bs persona

IR = Incremento de renta

$$\text{Nuevas viviendas}=AVPNH+AVPR \quad (12)$$

El número de viviendas es la suma de las nuevas viviendas por año (Ec13).

$$\text{NUMERO DE VIVIENDAS}=\text{NUMERO DE VIVIENDAS}+\text{Nuevas viviendas} \quad (13)$$

### Evolución de Suelo Residencial:

El suelo residencial es la extensión territorial en hectáreas ocupada por las viviendas por año en la ciudad de La Paz (Ec 14).

$$NSR=NV*SCPV \quad (14)$$

Donde:

NSR = Nuevo suelo residencial (Has)

NV = Nuevas viviendas

SCPV = Suelo consumido por vivienda  
El suelo residencial es la extensión territorial (en hectáreas) ocupada por las viviendas por año en la ciudad de La Paz (Ec 15).

$$\text{SUELO RESID.} = \text{SUELO RESID} + \text{NSR} \quad (15)$$

Donde:

NSR = Nuevo suelo residencial (Has)

### La estimación de la evolución de áreas verdes:

La determinación de áreas verdes se calculaba de manera proporcional a la extensión territorial ocupada por viviendas, en los últimos años la densidad poblacional de las ciudades provocó un nuevo estudio sobre este cálculo, determinándose que la extensión territorial de áreas verdes debe ser proporcional a la cantidad de habitantes, llegando a determinarse que, para preservar un ambiente adecuado de habitabilidad, por cada persona debe existir 5 metros

cuadrados de área verde (Bascuñan, Paz, & Freitas, 2007). La extensión de áreas verdes será calculada por la Ec 17 a partir del incremento de área verde por año (Ec 16)

$$\text{IAVPA} = \text{CHP} * 5\text{m}^2 \quad (16)$$

Donde:

IAVPA = Incremento de área verde por año.

CHP = Cantidad de habitantes proyectados por

año = incremento de población por año.

ÁREA VERDE URBANA =

$$\text{ÁREA VERDE URBANA} + \text{IAVPA} \quad (17)$$

### Calibración de los datos del modelo.

Para poder realizar la simulación del modelo fue necesario llevar a cabo un proceso de calibración considerando los datos censales de 1992 y 2001, cuyo resultado se observa en la Tabla 2.

Variables	Áreas Urbana de La Paz
Población 1992 (hab)	715900
Población 2001 (hab)	793293
Hogares 1992	170497
Hogares 2001	204090
Viviendas 1992	179121
Viviendas 2001	218854
Renta 1992	1000
Renta 2001	1090
Suelo Residencial 1992 en ha	18010
Suelo Residencial 2001 en ha	23100
<b>Área Verde 1992 en ha</b>	358
<b>Área Verde 2001 en ha</b>	397

Tabla 2. Variables sociodemográficas y uso del suelo de la ciudad de la Paz

A partir de estos valores se han obtenido los valores medios observados de las diferentes tasas descritas tanto en la Tabla 2 como a lo largo de la descripción del modelo. Con estos datos se ha realizado la simulación, efectuando primeramente algunos pequeños ajustes en los valores

de las diferentes variables (en particular de los valores de las tasas de calibración) para tratar de ajustar los resultados obtenidos por el modelo para el año 2001.

### Modelo con AC



Para el modelo de AC el mapa raster de la ciudad ha sido representado como una retícula bidimensional en la que cada pixel es interpretado como una celda del autómata. Cada celda podrá descifrarse como calle, edificio, parque o celda no ocupada.

En los AC las celdas contiguas o adyacentes cambian sus estados sus atributos o características a través de la respectiva aplicación de reglas simples. Este cambio es una función de lo que está sucediendo en la *vecindad* de la celda, esta vecindad usualmente definida como las celdas inmediatamente adyacentes, o celdas que "en algún caso" están cerca (Batty, 2005).

En el modelo de AC se consideró de suma importancia el factor de proximidad por ser la principal condicionante para el impulso del crecimiento urbano (Aguilera F., 2006), la accesibilidad a la red viaria es un otro factor que determina el costo de desplazamiento y la proximidad a las áreas urbanas, en este caso representado por la vecindad de áreas urbanizadas que representa un factor de atracción para futuros asentamientos urbanos.

El relieve de la superficie del terreno, un factor físico, es de consideración a la hora de tomar en cuenta una construcción urbana. La pendiente de la superficie, según el nivel de inclinación, implica costos económicos en las construcciones y también está ligado a determinados riesgos que influyen en la aptitud de urbanización del suelo. Para nuestro caso, tan sólo se tomó en consideración el costo económico que representa diferentes tipos de pendientes tomando como valor máximo 45°.

### Regla de transición

La probabilidad de cambio del suelo se dispone en función a tres factores: accesibilidad a la red viaria, proximidad a áreas urbanizadas y pendiente de inclinación del suelo (Ec 18).

$$P=f(A,V,I) \quad (18)$$

Dónde:

P: El potencial de cambio de no urbano a urbano.

A: La accesibilidad a la red viaria.

V: El factor de vecindad. Proximidad a las áreas urbanizadas.

I: La potencialidad del suelo para la urbanización. Implicación de la pendiente del terreno para la edificación.

La probabilidad de cambio fue calculada por la Ec 19.

$$P = A + V + I \quad (19)$$

### Implementación del modelo

Todo el desarrollo y ejecución del modelo se puede resumir en tres subprocesos: 1) procesamiento y normalización de los factores, 2) cálculo de la función de probabilidad de cambio y, 3) conversión de áreas no urbanas a urbanas. Por las limitaciones de espacio no se muestran los resultados intermedios de cada subproceso.

### Obtención de los factores y normalización

Previo al cálculo de la función de probabilidad de cambio, se realizaron pre-procesos para conseguir los valores de los factores que ingresarán a dicha función. El factor de accesibilidad se la obtiene a través del cálculo de la distancia euclidiana de cada pixel o celda hacia la red viaria, de esta manera cada pixel obtendrá un valor que determinará cuán próximo se encuentra de las vías y, en consecuencia, cuán accesible es cada área o pixel.

El factor de vecindad es calculado a través de un filtro digital que opera cambiando los valores de acuerdo a las características de los valores vecinos (Eastman, 2012). Sobre la capa resultante de la superposición de las capas vías y zona urbanizable se aplicó un filtro de 11x11, este filtro hace de ventana flotante posicionando su celda central sobre cada pixel de la capa, para realizar un promedio ponderado lineal respecto de sus celdas vecinas, todo este cálculo se ejecuto en el SIG Idrisi (Idrisi Taiga, 2009). Este valor asignado a cada celda, tras la aplicación del

filtro, denotará que: para un valor alto, ese pixel cuenta con áreas vecinas altamente urbanizadas; un valor bajo, significará que alrededor de ese pixel se encuentran muchas áreas por urbanizar, un valor bajo representa que este pixel se encuentra muy alejado de vecinos ya urbanizados.

Finalizando con la obtención de los factores, se procedió a la normalización de los datos con valores de 0 - 1 para poder operar en el cálculo de la función de probabilidad a una misma escala. Para esto, utilizamos una función lineal de conjuntos difusos de pertenencia con el módulo <FUZZY> de Idrisi. Para el caso de la accesibilidad, representado por la distancia hacia las vías, las áreas más próximas presentan el valor

de 1 y a mayor distancia se aproximan a 0. Las zonas con pendiente baja presentan valores próximos a 1 y las de pendiente alta valores cercanos a 0. Para el caso del factor de vecindad la normalización se realiza de manera automática dentro del módulo <FILTER> de Idrisi.

## RESULTADOS

Los resultados de la simulación del modelo con DS quedan expresados en la figura 2, donde se puede observar la proyección de las variables a lo largo de los 28 años de horizonte, vale decir hasta la gestión 2040, donde se destaca el incremento de suelo residencial (urbano) en un 38%.

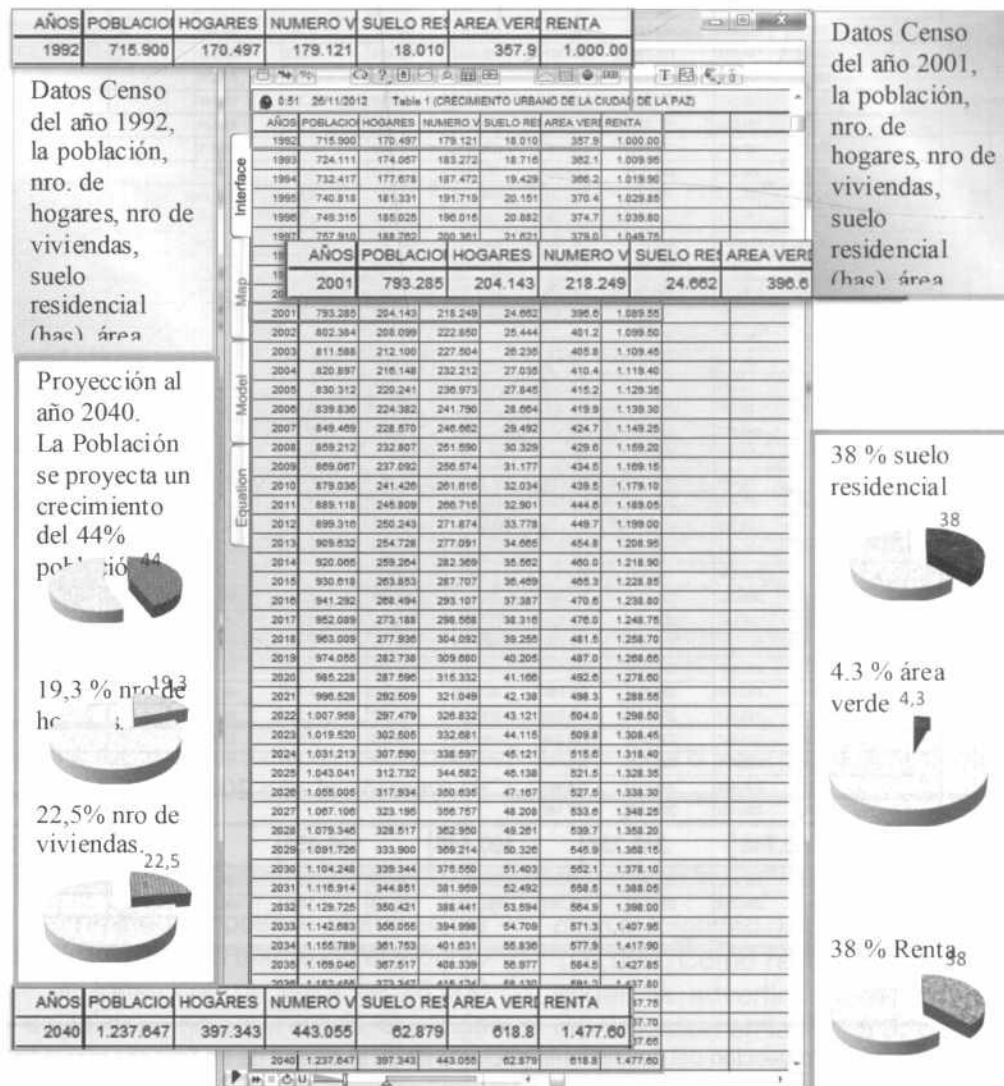


Figura 2. Resultado del Modelo de Simulación del Área Urbana de la Ciudad de La Paz al año 2040

De igual forma se procedió a la simulación por cada uno de los macrodistritos, obteniendo

las proyecciones de las variables analizadas al año horizonte 2.040 ( ver figura 3).

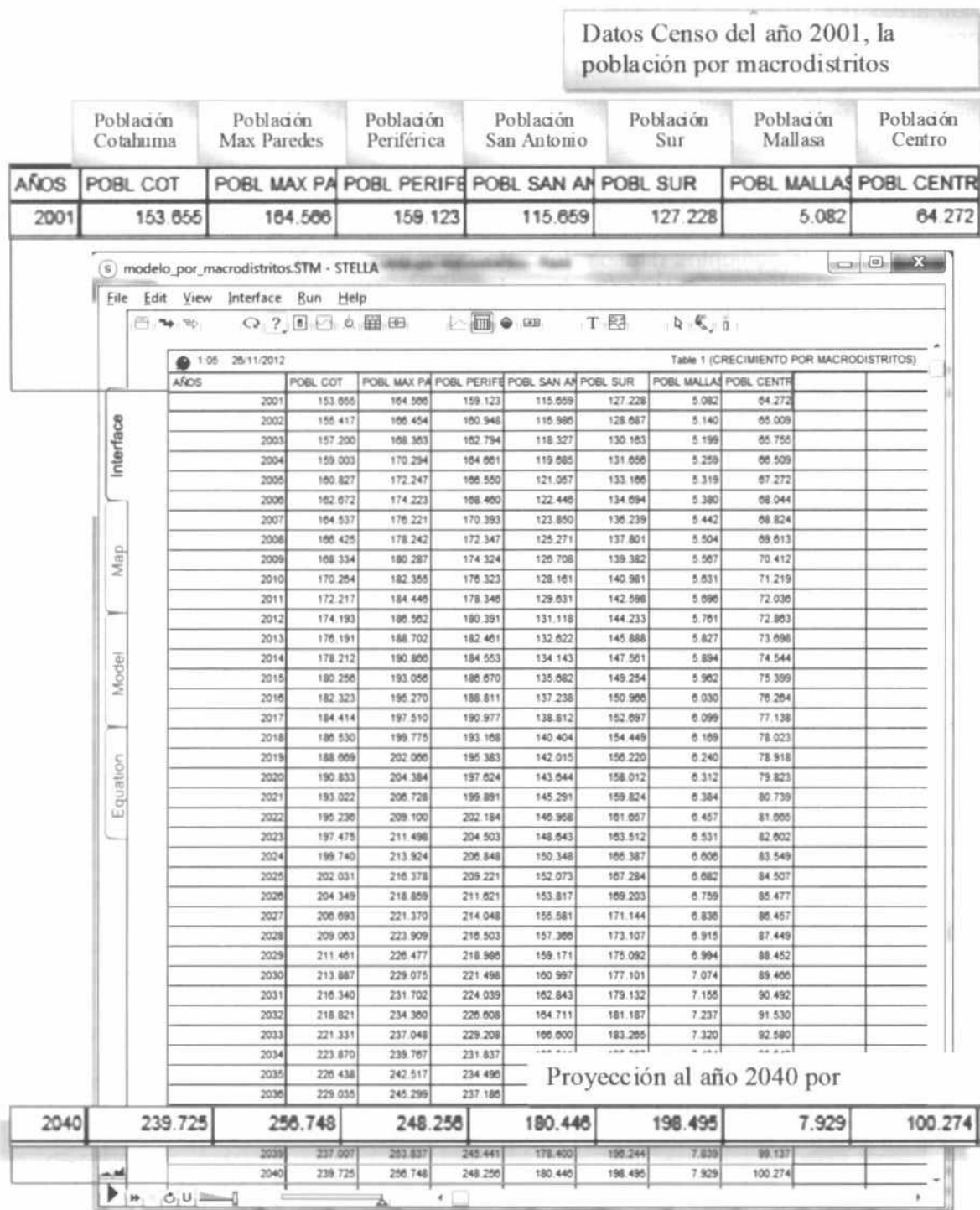


Figura 3. Resultado de Proyección del Crecimiento poblacional de la ciudad de La Paz por macrodistritos

### Modelo con AC

El resultado de la ejecución del modelo se trabajó sobre una capa de tipo ráster, por las facilidades de este formato para operaciones de sobreposición de las diferentes capas temáticas cartográficas. De la capa resultante, cada pixel fue clasificado a partir de un ranking establecido por los valores

de probabilidad calculados, colocando en primeras posiciones a aquellos pixeles que contengan los valores más altos para uso urbano y las áreas menos aptas al final del ranking. Los pixeles o celdas en esta capa tomaron los valores de 0 (no apto) y 1 (apto), mostrando la tendencia del suelo en cuestión (figura 4).

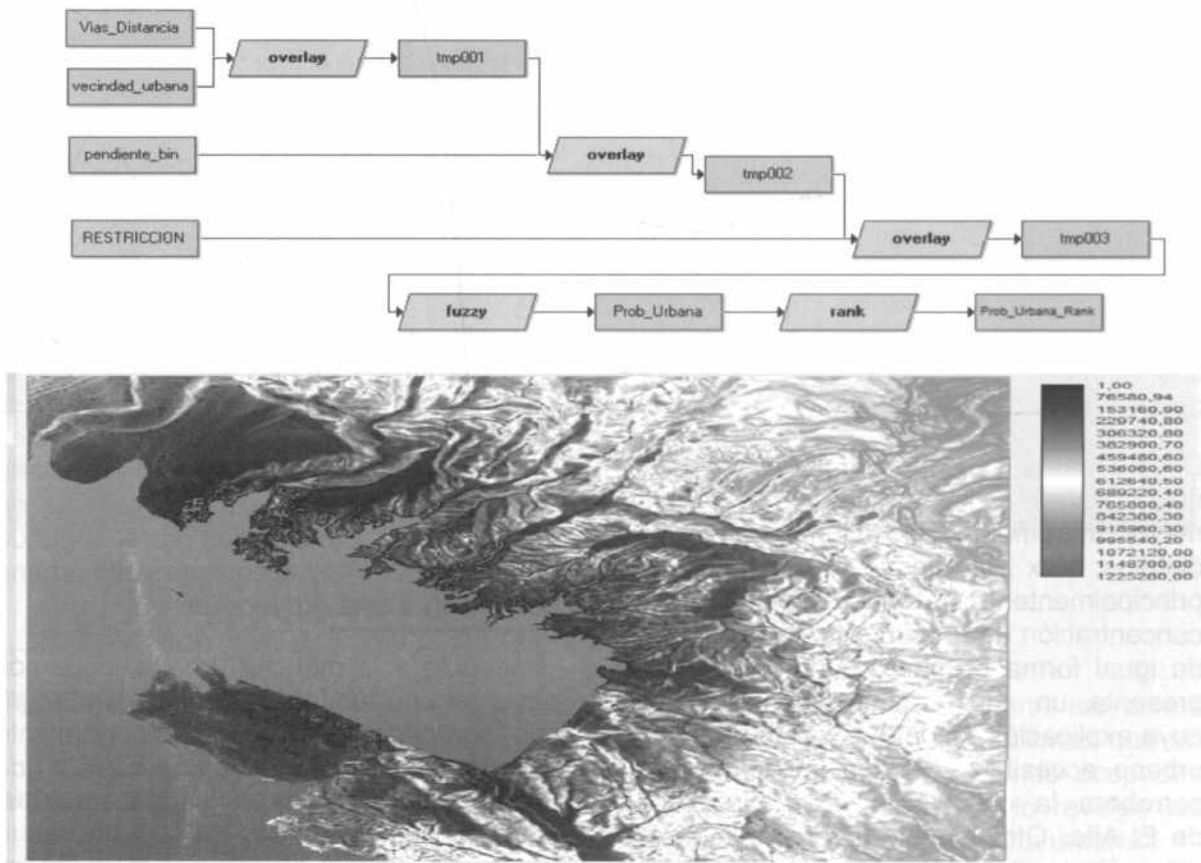


Figura 4. Resultado de haber aplicado el módulo <RANK> sobre el mapa de probabilidad urbana

A partir del ranking es posible observar las zonas de aptitud urbana utilizando el módulo <MOLA> de Idrisi, con un valor de 20.000 pixeles de inicio, incrementando en cada

ciclo la cantidad de pixeles hasta llegar a los 100.000. Como resultado de cada iteración podemos advertir las zonas probables de urbanización en la figura 5.

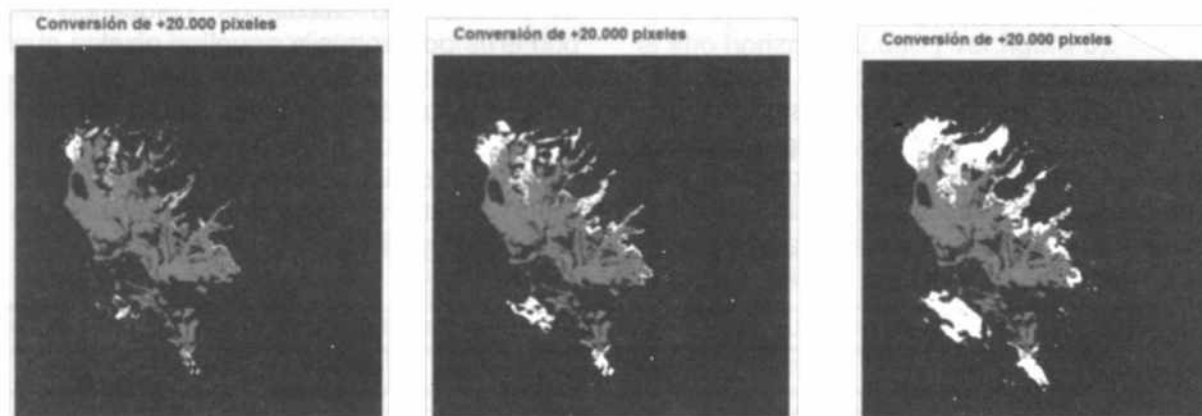


Figura 5. Sobreposición del resultado de los píxeles convertidos a urbano con la mancha urbana de la ciudad de La Paz

## DISCUSIÓN

El crecimiento poblacional proyectado fue contrastado por los datos elaborados por el personal de la oficina de Ordenamiento Territorial (OT) del GAMLP presentando una variación del  $\pm 5\%$ , lo cual nos lleva a deducir la validez del modelo.

De los datos hallados se puede advertir que algunos macrodistritos presentan mayor incremento poblacional como los distritos Max Paredes y Centro debido, principalmente, a la actividad comercial y a la concentración de la administración pública, de igual forma el macrodistrito Cotahuma presenta un incremento considerable, cuya explicación se debe al costo de suelo urbano accesible y, que al mismo tiempo, corrobora la conurbación con la ciudad de El Alto. Otro aspecto interesante es la extensión territorial, los macrodistritos Sur y Mallasa presentan un valor alto en relación a las otras zonas, este hecho se explica por el tipo de construcciones y el costo de terreno.

Los datos también demuestran que en la ciudad la extensión territorial de áreas verdes es muy baja, presentando un déficit importante que según la nueva forma de cálculo por densidad poblacional, se irá incrementando con el crecimiento

poblacional esperado, lo cual debe alertar a los planificadores urbanos para preservar las áreas protegidas y proyectar nuevas urbanizaciones en función al número de habitantes estimados.

La demanda de nuevas viviendas presenta un crecimiento alto por lo que se ve la necesidad de regular las edificaciones en consideración a la calidad de suelo en las áreas con mayor probabilidad de urbanización, identificadas por el segundo modelo y, planificar el equipamiento urbano en función a esta proyección.

Respecto a la mancha urbana, podemos observar una tendencia de crecimiento de tipo agregado, similar al comportamiento de otras ciudades latinoamericanas que presentan crecimiento adyacente al municipio consolidado.

En la región noroeste se observa un crecimiento sostenido, esta región es una de las más favorecidas en términos de adjudicación de áreas de crecimiento y por el análisis de las imágenes aéreas de la ciudad se comprueba su consolidación con nuevas viviendas, aun dispersas e informales (ver figura 6), también es importante observar el bajo costo que representa su adquisición. Por otro lado, en la región este el crecimiento es bastante

disperso por la presencia de muchas serranías al igual que la zona suroeste. El lado sureste de la ciudad viene a ser la más desfavorecida en términos de asignación de áreas de crecimiento, en ella se presentan

extensiones de tierras catalogadas como no urbanizables, razón por la que se ve menos favorecida en la adjudicación de pixeles urbanos en el proceso de conversión.

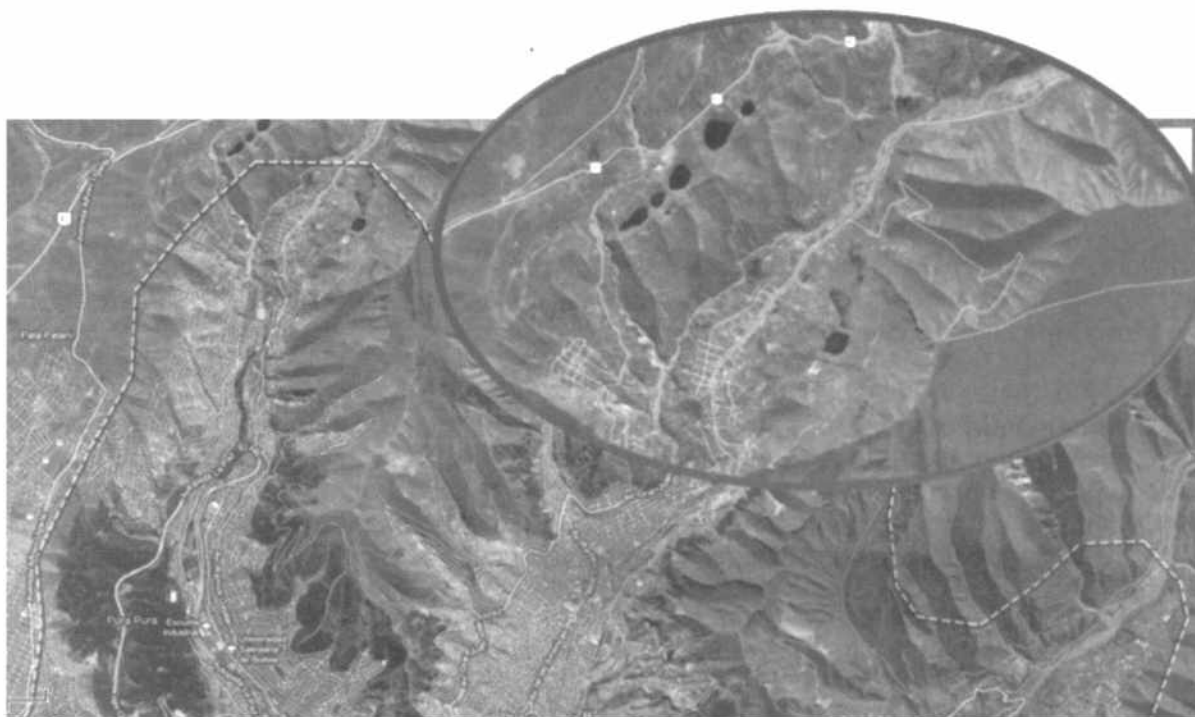


Figura 6. Nuevos asentamientos informales

## CONCLUSIONES

El modelo de simulación hallado refleja la realidad de la Dinámica de Sistemas de la ciudad de La Paz con un margen de error del 5%. La relación de causa - efecto de sus variables demuestra una alta cohesión lógica de los datos utilizados, generando proyecciones fiables para la planificación de la urbe, no obstante las limitaciones de los datos sociodemográficos disponibles.

El modelado con AC y su integración con bases de datos geográficas permiten el tratamiento de grandes volúmenes de información. Ajustar las reglas de transición para mejorar los resultados requiere del concurso de expertos, sin embargo con

el modelo hallado se advierte las zonas probables a urbanizar, las mismas que en algunos casos ya están siendo ocupadas de manera informal según lo revelan las imágenes aéreas de la mancha urbana.

El modelo basado en autómatas celulares permitió construir un modelo predictivo del crecimiento urbano y se constituye en una herramienta de

Las herramientas de modelado y simulación permiten el análisis y la evaluación de la dinámica urbana, aportando con mayor conocimiento a procesos de diseño y planificación que, esperamos, permitan la construcción de un territorio metropolitano más amigable, sostenible y habitable en el caso de la ciudad de La Paz. Con lo cual



el objetivo del proyecto ha sido alcanzado satisfactoriamente y el aporte al GAMLP es evidente.

## PROYECCIONES

La planificación urbana, en general, es desconocida en nuestro medio, al igual que las herramientas de modelado y simulación. Nuestras ciudades crecen de forma descontrolada y errática generando

múltiples problemas de salubridad urbana, de abastecimiento, de desplazamiento, etc., estos problemas son resueltos por las autoridades locales de forma parcial que permiten enfrentar la coyuntura pero pierden la visión a largo plazo. Los modelos presentados, con información histórica, podrían enfrentar estos problemas y reducir su impacto.

## BIBLIOGRAFIA

- Aguilera, F. (2006) *Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares*. Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica.
- Aguilera, F., Plata, W., Bosque, J., & Gómez, M. (2009). Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo* , 57-80.
- Bascuñan, F., Paz, W., & Freitas, J. (2007). Modelado de cálculo de áreas verdes en planificación urbana desde la densidad poblacional. *Redalyc* , 32-45.
- Batty, M. (2005). *Autómatas Celulares y formas urbanas: principios elementales*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2011, de Fractalcities: <http://www.fractalcities.org/>
- Bunge, M. (1972). *Teoría y realidad*. Barcelona: Ariel.
- Bustillos, O. (7 de Febrero de 2010). Los riesgos geológicos en la ciudad de La Paz. *El Diario* , pág. 25.
- Forrester, J. (1969). *Urban dynamics*. Massachusetts: The MIT Press.
- Gobierno municipal de La Paz. (2005). *Dossier Estadístico 2000-2005 del Gobierno Municipal de La Paz*. La Paz: Makency.
- Idrisi Taiga. (2009). Help System. Estados Unidos de América.
- Instituto Nacional de Estadística. (s.f.). *Instituto Nacional de Estadística*. Recuperado el 18 de Junio de 2012, de Banco de datos: <http://www.ine.gob.bo/>
- Programa de la Naciones Unidas para los asentamientos humanos ONU-habitat. (2012). *El estado de las ciudades de América Latina y el Caribe 2012*. Brasil: Onu-habitat.
- Tobler, W. (1979). A transformational view of cartography. *The American Cartographer* , 101-106.
- White, R., & Engelen, G. (1997). Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environment and Planning: Pla*