

# 9

## Prediciendo la coalescencia en los períodos Formativo y Tiwanaku en la cuenca de Titicaca: Un modelo simple basado en agentes\*

WM. RANDALL HAAS, JR<sup>i</sup> Y JACOPO TAGLIABUE<sup>ii</sup>

Las diferentes coalescencias de población es un fenómeno común entre las sociedades alrededor del mundo y a través del tiempo. Invariablemente, la coalescencia tiende hacia formas no lineales en las cuales existen pocos asentamientos grandes relacionados con otros pequeños (Figura 1). Este es el caso, durante el período Formativo, de la cuenca de Titicaca, donde las distribuciones del tamaño de los sitios conforman dos formas no lineales, bien conocidas, denominadas como distribuciones convexas y cóncavas (McAndrews *et al.* 1997). Johnson (1980) demostró una fuerte correspondencia entre estas formas no lineales y la integración económica. Esta observación ha proporcionado una base para muchas interpretaciones posteriores de las distribuciones del tamaño de los asentamientos arqueológicos (*e.g.*, McAndrews *et al.* 1997; Savage 1997; Brown y Witschey 2003; Drennan y Peterson 2004; Bandy y Janusek 2005). Aunque la relación entre la integración económica y las distribuciones del tamaño de asentamientos es fuerte, los vínculos causales entre ellos son más bien débiles debido a la imprecisión del concepto de integración económica y el alto grado de diversidad económica en la historia humana (Johnson 1980).

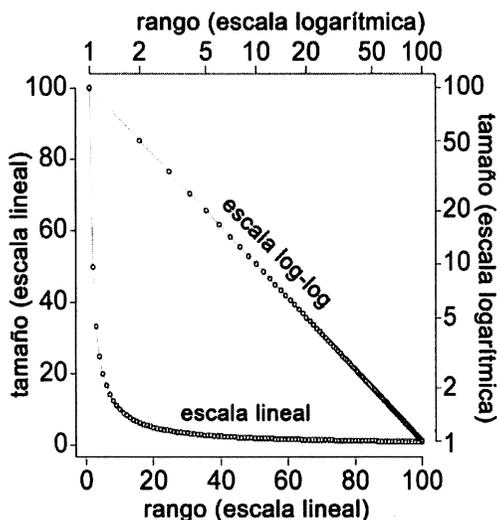
Sin embargo, nosotros podemos resolver este problema si consideramos que la disparidad del tamaño de los asentamientos está, en última instancia, relacionada con el desplazamiento de individuos y unidades sociales pequeñas en el tiempo y en el espacio. La variación en sus decisiones sobre dónde residir debería tener importantes efectos acumulativos sobre la coalescencia diferencial de la población. Por supuesto, tales decisiones a menudo proceden de preocupaciones económicas, aunque otras variables

---

\* Traducido al castellano por Henry Tantaleán (editor) y Kenichiro Tsukamoto (University of Arizona).

i Escuela de Antropología, The University of Arizona. wrhaas@email.arizona.edu.

ii Departamento de Filosofía y CRESA, San Raffaele University, Milan.



**Figura 1.** La forma y la visualización de la distribución no lineal en un gráfico de rango-tamaño. Las dos líneas representan exactamente la misma distribución en el espacio lineal (abajo a la izquierda) y el espacio de registro (superior derecha). En ambas representaciones, el eje X es el orden de clasificación de los sitios de mayor a menor, y el eje Y es el tamaño del sitio en hectáreas. Este ejemplo particular muestra una distribución Zipf.

la migración de individuos entre asentamientos y (3) la tendencia de esos individuos para migrar hacia asentamientos próximos y/o grandes con alguna probabilidad, “*p*”. De acuerdo con nuestro modelo, el tamaño de los asentamientos grandes es particularmente sensible a “*p*” y, a un menor grado, a la distribución espacial de los asentamientos iniciales. Cuando realizamos esta aproximación de gravedad basada en la población a una geometría que configura un paisaje agropastoril, descubrimos que el tamaño de asentamiento modelado y las distribuciones geográficas son coherentes con las distribuciones poblacionales del período Formativo en la cuenca de Titicaca.

### LAS DISTRIBUCIONES DE ASENTAMIENTO EN LA CUENCA DEL TITICACA

La síntesis completa de la arqueología de la cuenca del Titicaca, que fue escrita por Stanish (2003), proporciona la base de los antecedentes arqueológicos dados aquí. De una distribución relativamente uniforme de pequeñas aldeas agropastoriles (menor que una hectárea) de los períodos Arcaico Terminal y Formativo Temprano (ca. 2000–1300 a.C.) surgieron centros regionales altamente aglutinados (por encima de las ocho hectáreas) del período Formativo Medio (ca. 1300–500 a.C.). Varios desarrollos tecnológicos afectaron esas transformaciones económicas. El surgimiento de la producción agrícola durante el Arcaico Terminal (Aldenderfer 1989) promovió la formación de aldeas sedentarias y el crecimiento de la población. La crianza de camélidos durante este mismo período habría reducido los costos de transporte de los

tales como oportunidades de emparejamiento, participación religiosa, protección (Arkush y Allen 2006; Walker 2001), o espectáculo social (e.g. Holt 2009) también juegan papeles importantes en la nucleación de individuos. Todos esos recursos tienen en común el hecho que su valor está directamente relacionado con la densidad poblacional y, por lo tanto, la población puede servir como indicativo de la atractividad de un centro poblacional dado (Stewart 1948).

En este capítulo presentamos un modelo basado en agentes que explora cómo las decisiones de migración, basadas en los individuos, pueden afectar el tamaño y la distribución espacial de poblaciones coalicionadas. Encontramos que los siguientes tres parámetros son suficientes para generar las propiedades cualitativas observadas en muchas distribuciones del tamaño de los asentamientos arqueológicos: (1) condiciones iniciales de asentamientos pequeños geográficamente dispersos; (2)

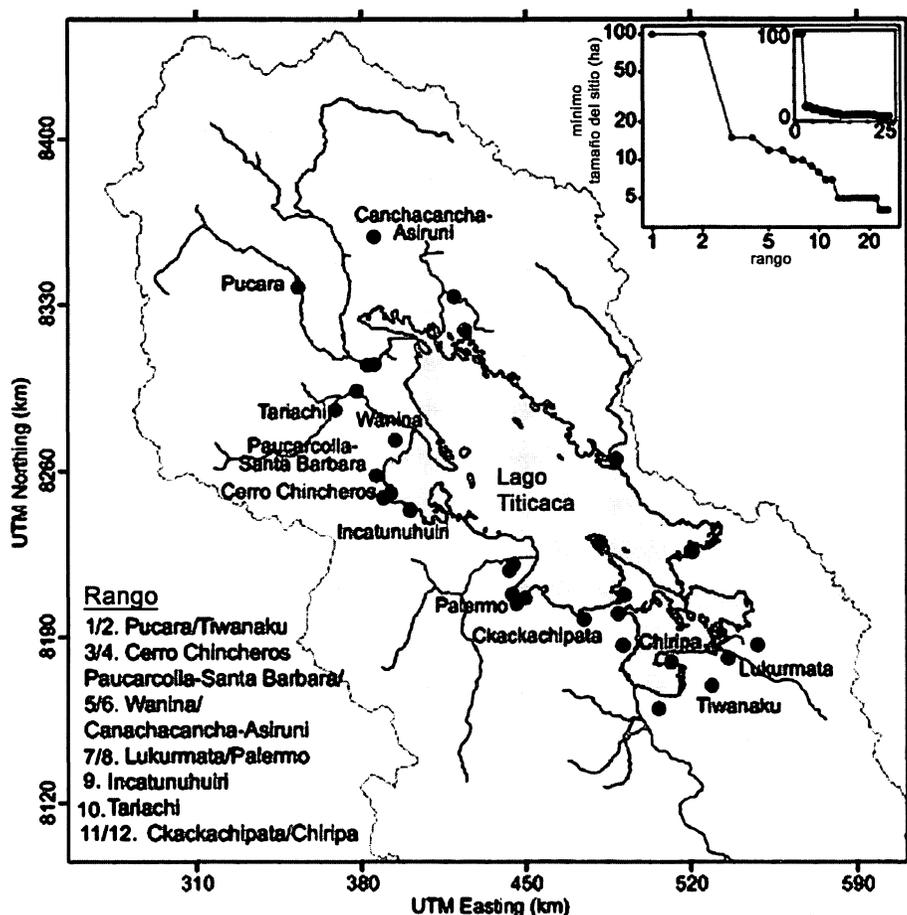
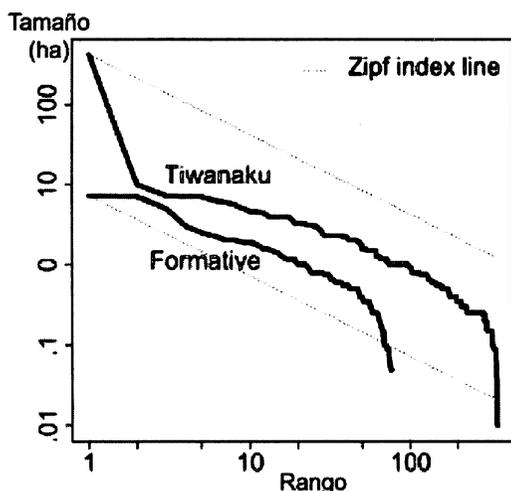


Figura 2. Las ubicaciones de los 31 sitios más grandes conocidos del Formativo Superior de la cuenca del Titicaca. Estos sitios más grandes se representan en forma lineal y el espacio de registro (log-space) en la esquina superior derecha. Los datos de Stanish (2003) y Stanish *et al.* (2005).

productos agrícolas y otros bienes (Tripceovich 2007). Además la agricultura de campos elevados, la cual habría empezado durante el período Formativo Medio, habría aumentado significativamente las producciones agrícolas (Stanish 2003).

Durante el período Formativo Superior (ca. 500 a.C.–400 d.C.), por lo menos 31 asentamientos alcanzaron tamaños mayores a cuatro hectáreas y al menos nueve excedieron el máximo de ocho hectáreas de los precedentes asentamientos del período Formativo Medio (Stanish 2003; Stanish *et al.* 2005). La Figura 2 muestra que las distribuciones de los asentamientos del Formativo Superior tomaron una forma de *primate*<sup>1</sup> (Berry 1961) con dos centros regionales –Pucara y Tiwanaku– creciendo en un orden

1 Este es un concepto tomado de Berry (1961: 573-588) que se refiere a una distribución de poblaciones con una o más poblaciones que son muy grandes en comparación a otras poblaciones.



**Figura 3.** Las distribuciones de tamaño de rango de los sitios del periodo Formativo y Tiwanaku en el valle de Tiwanaku. Los sitios del período Formativo se ajustan a un rango de tamaño de distribución convexa y los sitios Tiwanaku se ajustan a una distribución cóncava (o primate); la distribución (McAndrews *et al.* 1997).

Los datos de Albarracín-Jordán (1996).

no de Tiwanaku alcanzando la primacía (Figura 3). En el período Formativo previo no se exhibe tal primacía, ni las regiones adyacentes contienen sitios de tamaño suficiente para ser considerados como la forma de *primate* para el valle de Tiwanaku (Janusek 2004; Bandy 2004).

La participación del agrupamiento geográfico fue otro índice independiente de la desigualdad económica, política y religiosa. Durante el período Formativo Medio, la producción cerámica llegó a ser más especializada en los centros regionales. En esta etapa también surgió una tradición estilística, Yaya-Mama, que se hace evidente en las estelas que están concentradas en los centros regionales. Stanish (2003) plantea que la tradición estuvo vinculada con las elites y con una ideología pan-regional. En el período Formativo Superior, la arquitectura pública, tales como los patios hundidos y los montículos artificiales o pirámides, aparecieron en los centros regionales. Janusek (2004) demuestra que la arquitectura e iconografía en Tiwanaku fueron diseñadas para cooptar el poder de la naturaleza e integrar diversos grupos culturales. Además, él sugiere que el éxito de Tiwanaku en “dejar fuera de competencia” a otros centros regionales se originó de su única tradición religiosa integrativa.

### DISTRIBUCIONES NO LINEALES DE TAMAÑO DE ASENTAMIENTOS

Los patrones de tamaño de asentamientos en la cuenca del Titicaca discutidos aquí, pertenecen a una clase general de distribuciones no lineales. De hecho, la no linealidad es un contraste bien documentado de las distribuciones del tamaño de sitios en los asentamientos prehistóricos y modernos alrededor del mundo (Zipf 1949; Jo-

de magnitud más grande que cualquiera de los otros centros. Entre 200 y 300 d.C., Pukara colapsó como un gran centro regional mientras que Tiwanaku continuó creciendo. Alrededor de 500 d.C., Tiwanaku había alcanzado aproximadamente 100 hectáreas en tamaño, y alrededor de 800 d.C., la capital urbana ocupaba aproximadamente 600 hectáreas y albergó una población nuclear de entre 10,000 a 20,000 habitantes (Janusek 2004). No fue hasta 1100 d.C. que el Imperio Tiwanaku, que había llegado a ser un estado conquistador, comenzó a colapsar.

En un nivel más local, McAndrews y colegas (1997) muestran que los asentamientos del período Tiwanaku, del valle del mismo nombre, se ajustaban a una distribución *primate* durante el período Tiwanaku con el centro urba-

hanson 1980; Laxton y Cavanagh 1995; Krugman 1996; Hamilton *et al.* 2007), por no hablar de muchos otros fenómenos biológicos y no biológicos (Clauset *et al.* 2009). A primera vista, estas distribuciones, más o menos continuas, parecen ser discretas y jerárquicas (*e.g.* Christaller 1966), para los habitantes y analistas por igual. Sin embargo, la categorización resultante de las distribuciones continuas puede enmascarar una importante variación que tiene el potencial para informarnos sobre los diferentes procesos y comportamientos humanos subyacentes. Cuando las distribuciones no lineales son examinadas como un fenómeno continuo, a menudo toman una de las cuatro formas distintas: Log-lineal, primate, convexa y primo-convexo (McAndrews *et al.* 1997; Figura 4).

Sí estuviéramos viendo esas distribuciones en un histograma, observaríamos formas caracterizadas por las letras L o J en lugar de las más familiares forma de campana o distribución plana. Sin embargo, los histogramas no se prestan bien para discriminar entre las cuatro diferentes formas no lineales enumeradas arriba. El gráfico (*plot*) de la escala logarítmica del rango-tamaño, por otra parte, proporciona un método que facilita la interpretación para explorar la variabilidad que de otra forma, sería opaca en las distribuciones no lineales. En las gráficas de rango-tamaño, el tamaño de la entidad es trazado como una función de su rango, la cual es simplemente su posición cuando está ordenada por tamaño (Figura 1). De este modo, el sitio más grande en una distribución se clasifica como el rango 1, el segundo más grande, el rango 2, y así sucesivamente. Cuando los ejes son transformados logarítmicamente, las distribuciones no lineales aparecen relativamente rectas mientras que *random* (azar) o distribuciones normales, aparecen como curvas extremadamente convexas.

Las formas “Log-lineales”, que aparecen como líneas rectas en el registro espacial, han recibido la mayor atención. También se conocen como las distribuciones de la ley de potencias o rectilíneas (también véase Griffin (2011), para una discusión sobre el uso del término “log-normal” en la literatura arqueológica). Tales distribuciones pueden variar con respecto a sus límites inferiores y superiores y a su pendiente, o a sus dimensiones fractales (Adamic y Huberman 2002; Brown *et al.* 2005; Clauset *et al.* 2009; Griffin 2011). Cuando la pendiente de una distribución log-lineal es -1, esta aparece como un ángulo de 45° en una gráfica log-log de rango-tamaño que tiene rangos equivalentes para los ejes. Esta forma particular de log-lineal se denomina como ley de Zipf, luego que George Zipf (1949) dedicara muchas páginas para catalogar y entender esta regularidad empírica. El proceso exacto subyacente de la formación de la ley de fuerzas –especialmente las distribuciones de Zipf– aún no es el todo comprendido, pero muchos analistas parecen concordar en que el proceso está relacionado con los flujos de red que distribuyen o disipan algunas divisas (Zipf 1949; Krugman 1996).

Posteriormente, Gregory Johnson (1980) describió una desviación arqueológica común en la distribución de Zipf, que se denomina convexidad del rango de tamaño (Figura 4). En estas distribuciones, los asentamientos más grandes y los más pequeños son menores que lo que se observaría en una tendencia log-lineal; o a la inversa, los asentamientos de tamaño mediano son mayores que lo que podamos observar en una tendencia log-lineal (McAndrews *et al.* 1997).

A partir de seis casos de estudios arqueológicos e históricos que abarcan desde 2800 a.C. a 1850 d.C. de México a China, Johnson observó que la convexidad se correlaciona inversamente con la integración económica, como se deduce de los datos de redes de transporte y transacciones económicas. Él cautelosamente definió la integración económica como la interdependencia estadística de los tamaños de la población; sin embargo, también advirtió que la baja integración solamente establece una restricción sobre la emergencia de los patrones de rango de tamaño log-lineal, y que los sistemas integrados económicamente podrían aún exhibir las distribuciones de rango de tamaño convexo. Además, la toma de muestras también puede jugar un papel en la identificación de convexidad. El reparto de dos o más sistemas sociopolíticos integrados o una muestra que aísla los asentamientos en el borde de un sistema dendrítico tendería a producir la firma de un sistema no integrado.

La forma de distribución, que es evidente en el período Formativo en el valle de Tiwanaku, puede describirse como convexo (McAndrews *et al.* 1997). Aunque es posible –incluso probable– que alguna de las convexidades observadas sea resultado de la fusión temporal inevitable, no es muy probable –basado en evidencia material– que los patrones del valle de Tiwanaku sean la consecuencia efecto-resultado.

Lo opuesto a la distribución convexa es la distribución cóncava o *primate*, la cual se hace evidente en los períodos Formativo y Tiwanaku de la cuenca (Figura 2). Se supone que la primacía indica integración vertical como en un sistema económico radial (Johnson 1980). En su mayor parte, las distribuciones cóncavas representan la “cola superior”<sup>N.E.</sup> de distribuciones primo-convexo, las cuales tienen cola inferior convexa (Figura 4). Ya que todas las distribuciones no lineales discutidas aquí tienen “cola inferior convexa”, y puesto que las distribuciones cóncavas típicamente omiten los sitios más pequeños que de otro modo resultaría en una distribución primo-convexo, nosotros encontramos poca utilidad en la forma primo-convexo y subsumiría a este bajo la categoría cóncava o *primate*. Es decir, la concavidad describe la distribución de asentamientos del período Tiwanaku en el valle de Tiwanaku, así como también la distribución del período Formativo superior en toda la cuenca.

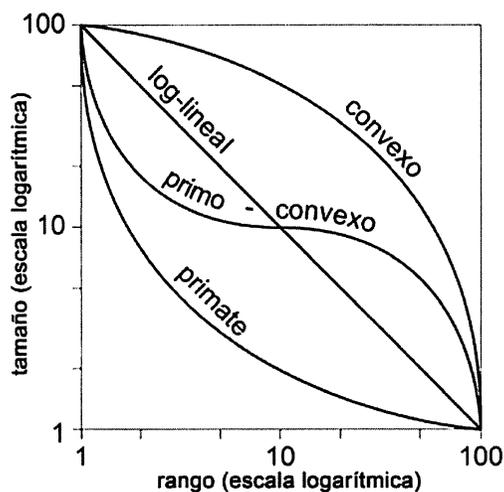


Figura 4. Cuatro variedades de las distribuciones no lineales, de tamaño-asentamientos, son observadas arqueológicamente, incluyendo formas log-lineal, convexa, cóncava y cóncava-convexo (McAndrews *et al.* 1997). Las distribuciones cóncavo, o *primate*, sin embargo, a menudo representan el extremo superior de las distribuciones cóncavo-convexas, y los dos se agrupan por lo tanto como una categoría en este documento. Del mismo modo, las distribuciones log-lineales en general, representan el extremo superior de una distribución con una cola convexa inferior.

Una explicación más matizada sobre estas distribuciones en la cuenca de Titicaca es la proporcionada por Albarracín-Jordan (1996), quien plantea que los asentamientos secundarios representan lugares centrales para el agrupamiento de asentamiento regional, con el fin de movilizar la fuerza de trabajo a diferentes tareas agrícolas. Por otra parte, él muestra que el conjunto de asentamientos se atribuye a la proximidad del potencial agrícola y de tipos de campo, que incluye terrazas, campos elevados, y *qochas*. Los patrones de asentamientos también forman una jerarquía enlazada resultado de las relaciones sociales que son análogas a los modelos etnográficos de ayllus Ayamara. Conocido como ayllu, esta forma de organización social consiste en las unidades socio-económicas que se integran por sangre o parentesco ficticio tras las zonas ecológicas y con otros ayllus. Este modelo contrasta en gran medida con los modelos previos que vieron a Tiwanaku como un aparato altamente centralizado y burocrático y cuyos centros coloniales imperiales fueron creados para administrar la producción agrícola a lo largo del valle de Tiwanaku.

#### UN MODELO SIMPLE DE GRAVEDAD BASADO EN EL INDIVIDUO

Mientras las observaciones previamente mencionadas sobre la estructura de las distribuciones de tamaño de asentamiento tienden hacia explicaciones funcionales, la mayor parte no discuten explícitamente cómo tales sistemas jerárquicos emergen. El modelo de Griffin y Stanish (2007) es, tal vez, la única excepción. Este hace un trabajo notable al mostrar cómo las dinámicas sociales y políticas, en el contexto del agropastoralismo del período Formativo, pueden dar surgimiento a las diferentes propiedades de la trayectoria histórica de la cuenca del Titicaca. Tales propiedades incluyen la emergencia de patrones de tamaño de asentamientos convexo y pimate. Sin embargo, la predicción del tamaño del asentamiento es sólo un componente de su modelo multivariable y, por lo tanto, es difícil discernir cuál de las diferentes variables necesariamente contribuye a las distribuciones de tamaño de asentamiento modeladas. De este modo, aunque Griffin y Stanish demuestran la utilidad de la modelización basada en los agentes para contrastar su entendimiento de las dinámicas sociales regionales (también véase Gumerman *et al.* 2003), los modelos basados en los agentes también pueden ser usados para explorar cómo reglas repetidas simples pueden dar surgimiento (o fallar en darlo) a los fenómenos materiales macroscópicos (Lansing 2002; Premo 2007).

Aquí nosotros utilizamos una modelización basada en los agentes para explorar un mecanismo simple de abajo hacia arriba, para la emergencia de diferentes distribuciones no lineales en los sistemas sociales. Postulamos que los individuos que se mueven entre comunidades –*e.g.* para buscar emparejamiento, oportunidades

---

n.e. Se trata de una prueba estadística, en la que la cola superior es el pico de la derecha, pues to que representa a la cantidad de miembros del eje Y (en la vertical) que reciben más elementos del eje X (en la horizontal): es cola por la forma pero es superior porque recibe más. En ese sentido, expresa un patrón distributivo. Quizá por esa razón, en algunos casos, se usa para querer decir simplemente *el segmento más alto*. Es una innovación procedente del inglés *the upper tail*. Del mismo modo la cola inferior, es otra comprobación de la hipótesis, también llamada prueba de la cola izquierda que vendría a ser *el segmento más bajo*.

económicas, u otras— preferentemente se adjuntarían a los asentamientos que proporcionan un compromiso óptimo entre proximidad geográfica y población. Esta simple regla basada en los agentes, en el contexto de asentamientos espacialmente dispersos, deberían ser suficiente para generar fenómenos extensos, a macro-escala, de distribuciones de tamaño de asentamiento no lineal. Rihl y Wilson (1991) toman un modelo de gravedad similar en sus esfuerzos por comprender la formación de los patrones de asentamiento prehistórico en Grecia. A propósito, y en el espíritu de Johnson (1980), ellos ven el uso del método de gravedad basado en la población como un sustituto para estimar la importancia económica de un asentamiento dado. En contraste, nosotros vemos a las poblaciones como el capital corriente atrayendo migrantes potenciales. En otras palabras, la población y las relaciones sociales son los recursos en nuestro modelo.

Para contrastar esta idea, creamos un modelo basado en los agentes usando el programa de modelización NetLogo 4.1 (Wilensky 1999). El modelo aleatorio establece un paisaje homogéneo cuadrado con una cantidad de asentamientos especificada por el usuario. Cada uno de los asentamientos comienza con una población de 25 individuos, y en cada paso de tiempo, un individuo de cada aldea migra hacia otra aldea. Comparamos tres variedades de este modelo. El primero, en un modelo nulo, los agentes escogen moverse aleatoriamente entre aldeas. El segundo, en un modelo de gravedad, los agentes migraron a las aldeas con el tamaño más grande: relación de distancia. El último, en un modelo híbrido, los agentes tienden hacia un tamaño “óptimo”: solución de distancia con alguna probabilidad,  $p$ , de “error.” El último modelo intenta dar cuenta de las distintas posibilidades en las que los individuos tomarán decisiones de migración por razones en las que no necesariamente buscan aldeas próximas o grandes.

Generamos 30 modelos de ejecución para cada una de las cuatro variaciones de  $p$  (Figura 5). Todos los modelos comenzaron con una distribución plana de aproximadamente 1000 asentamientos, y que permiten ejecutar 500 pasos de tiempo. En el primer caso —el modelo aleatorio—  $p$  empieza en 100, efectivamente creando un movimiento aleatorio entre los asentamientos. El modelo se instaló en un estado estable después de aproximadamente 500 pasos de tiempo y que se muestra en la Figura 5. Aunque este modelo no genera una distribución que hayamos visto arqueológicamente, este no produjo una distribución de rango de tamaño no lineal que es extremadamente convexa<sup>2</sup>.

En los modelos siguientes —ambos casos híbridos— “ $p$ ” toma un rango entre 95 y 50%. En otras palabras, cada aldea escogería el mayor tamaño-distancia del asentamiento a 5 o 50% de tiempo, respectivamente. El resto del tiempo, ellos escogerían moverse hacia una ubicación aleatoria. Estos modelos también se estabilizaron después de 500 ejecuciones aproximadamente, con una forma final que consistió de solo unos cuantos asentamientos. Aunque el resultado final no se ajusta con las distribuciones de tamaño de los asentamientos empíricos, el modelo produce distribuciones realistas durante el

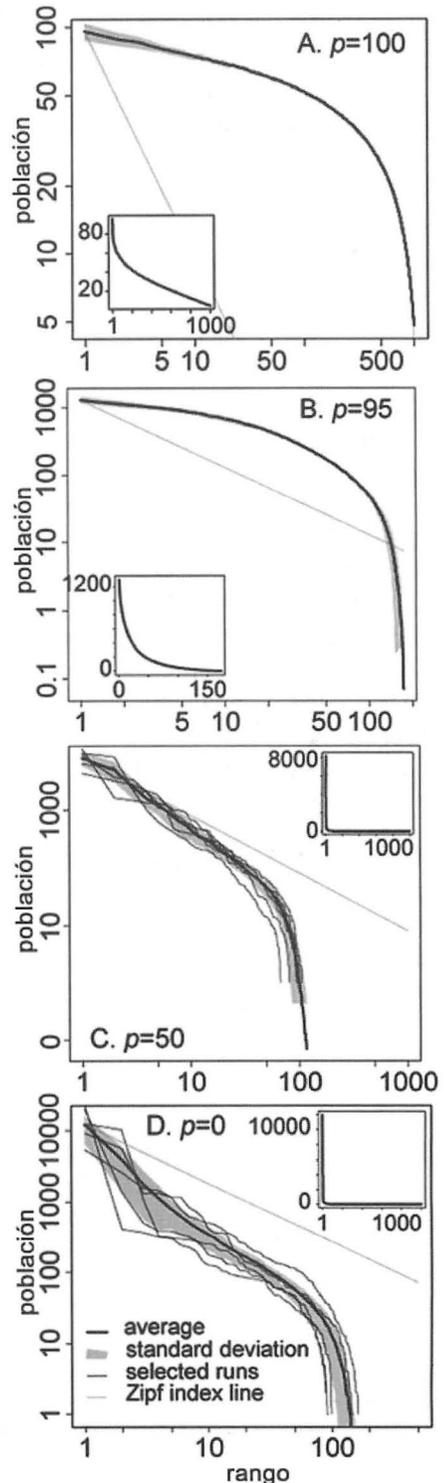
2 Debemos señalar que este resultado más bien es contrario a la intuición, el cual produce distribuciones ordenadas a partir de procesos aleatorios. No fue sorprendente, en este caso, ya que el Dr. Thomas Carter, de la Universidad Estatal de California en Stanislaus, nos había mostrado esencialmente el mismo modelo aplicado a las transacciones de la riqueza.

**Figura 5.** Los resultados de la distribución tamaño-asentamientos para los 120 modelos ejecutados, que consta de 4 diferentes valores de  $p$ , la probabilidad de que cualquier agente no opta por el tamaño óptimo: la solución de distancia de la hora de elegir un pueblo para emigrar. Como  $p$  disminuye de 100 y 0 por ciento, el resultante de los cambios en la distribución cambia de convexa a log-lineal a cóncavo.

curso de movimiento entre los estados inicial y terminal. El  $p=95$  del porcentaje de ejecución tendió a tomar una distribución convexa mucho más atenuada que el modelo aleatorio, y el  $p=50$  del modelo porcentual tomó una forma log-lineal. Cualitativamente, el 95 por ciento del modelo de distribución es muy consistente con la distribución de tamaño de asentamientos del período Formativo del valle de Tiwanaku.

Finalmente, el  $p=0$  del modelo porcentual, el cual tenía agentes que elegían migrar al asentamiento con la más alta proporción de tamaño-distancia del 100% del tiempo, tendieron a producir una distribución de *primate*. La Figura 5 muestra que el promedio de 30 repeticiones es ligeramente cóncavo en “cola superior” indicando que la mayoría de ejecuciones son *primate*. La mayoría de las muestras repetidas produjo las distribuciones de tamaño similar cualitativamente a las distribuciones *primate* del período Formativo Superior de la cuenca de Titicaca y el período Tiwanaku del valle de Tiwanaku.

La ejecución de modelo revela dos tendencias generales con respecto a “ $p$ ” y a las distribuciones de tamaño de asentamientos. La primera, a medida que “ $p$ ” decrece entre 100 y 0, la transición de las distribuciones del rango-tamaño pasa desde convexa hacia log-lineal a *primate*. La segunda, a medida que “ $p$ ” disminuye, el grado de variación aumenta. En otras palabras, a medida que la previsibilidad del comportamiento del agente aumenta, la previsibilidad del tamaño de los asentamientos disminuye.



### EL MODELO DE GRAVEDAD EN EL PAISAJE SOCIAL DEL PERÍODO FORMATIVO

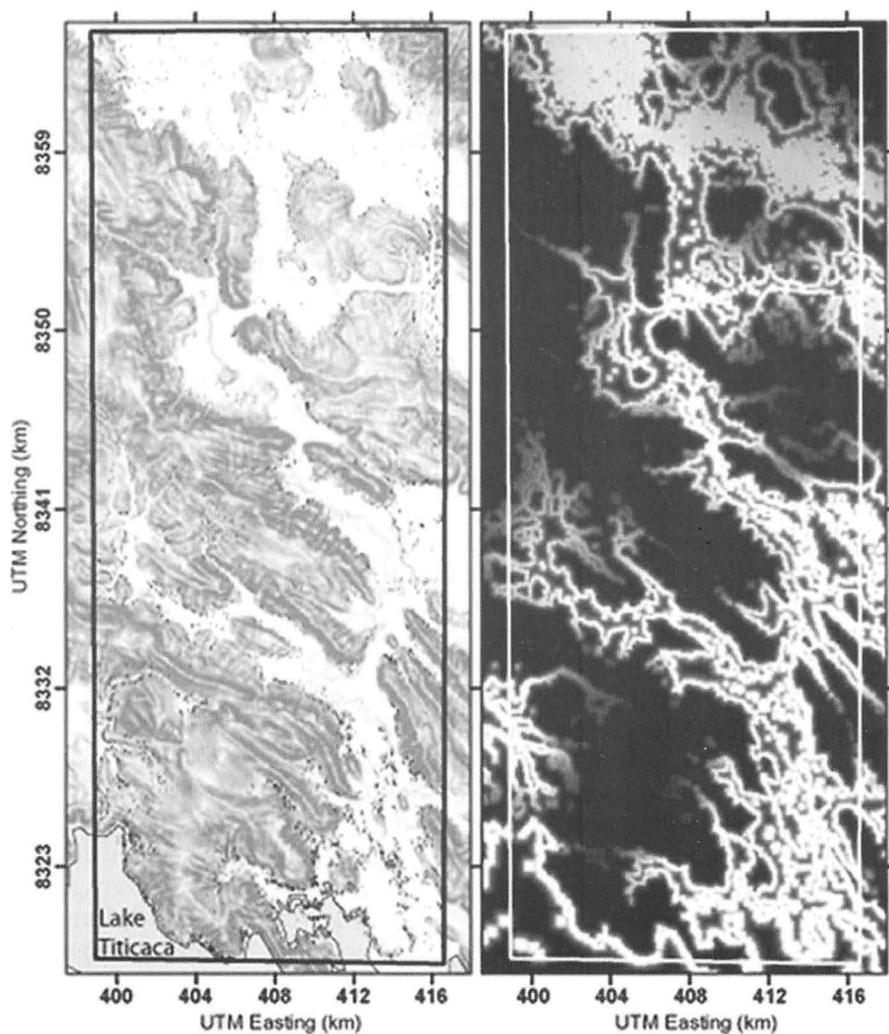
A través de los resultados dados sobre un paisaje genérico, preguntamos posteriormente si el modelo de gravedad tendrá algún poder para la predicción de la ubicación de los centros de población de más alto rango de la cuenca tales como Tiwanaku, Pukara, Lukurmata, entre otras. Griffin y Stanish (2007) sugieren que la geometría de las regiones habitables de la cuenca habría influido en la formación de asentamientos de *primate* en las regiones norte y sur donde las poblaciones habrían sido más grandes. En consecuencia, ejecutamos el modelo de gravedad sobre un paisaje con la misma geometría como el paisaje agropastoril de la cuenca del Lago Titicaca.

### MODELIZANDO EL PAISAJE SOCIAL DEL FORMATIVO

Con el objetivo de estimar el paisaje social agropastoril del Período Formativo, generamos un modelo predictivo sobre las ubicaciones modernas de aldeas agropastoriles en la región Huancané-Putina en la cuenca norte (Figura 6). Utilizando Google Earth (Google Inc. 2010), nosotros digitalizamos las ubicaciones de 6,630 aldeas agropastoriles en un área de 838 km<sup>2</sup> usando una imagen satelital, Quickbird 2, de 60-cm de resolución, del 25 de julio de 2006. Esos puntos luego fueron importados hacia el programa de sistemas de información geográfica ArcGIS (Environmental Systems Research Inc. 2008) y superpuestos al reconocimiento geológico, de los Estados Unidos, de 90-m de resolución, de la Misión Topográfica de Radar, volada en el Transbordador Espacial, también conocida en inglés como *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para modelos digitales de elevación o DEM (Farr *et al.* 2007).

La inspección visual de las ubicaciones de las aldeas agropastoriles sugirieron que la densidad de asentamiento está directamente relacionada con –en orden de importancia– la proximidad a los bordes de las terrazas aluviales, elevación y proximidad al lago Titicaca. Para visualizar esta relación, usamos el programa ArcGIS para aislar los bordes de las terrazas y los límites del lago de los datos SRTM y calcular las distancias desde cada uno de esos rasgos para cada una de las aldeas digitalizadas. La regresión logística fue realizada usando la función del modelo lineal generalizado en lenguaje de computación estadística R (The R Foundation, 2009). El modelo de superficie que resultó se muestra en la Figura 6. Este modelo muestra la probabilidad de encontrar una aldea agropastoril en un lugar determinado. Luego, el modelo fue aplicado a toda la cuenca del Titicaca para definir la probabilidad con la cual una aldea del período Formativo estaría localizada en una ubicación dada durante cualquier modelo de ejecución. Para los propósitos de eficiencia computacional, nosotros muestreamos el modelo de resolución de 90 m a 1300 m.

Reconocemos que existen dos defectos importantes con este método de modelización del paisaje agropastoril del período Formativo; asumimos que la densidad de las aldeas agropastoriles modernas proporciona un índice razonable para las ubicaciones prehistóricas. Dada la dificultad en compilar una base de datos geográfica comparativamente sólida de sitios arqueológicos del período Formativo y el hecho que la habitación doméstica probablemente no ha cambiado mucho desde el período Formativo, estamos relativamente cómodos con el supuesto que los datos geográficos modernos son apropiados para nuestra tarea.



**Figura 6.** La distribución geográfica de las modernas aldeas agropecuarias en la región de Huanacané-Putina superponiéndose a una superficie inclinada (izquierda) y una superficie de regresión logística para la probabilidad de modernos pueblos agropastoriles en la misma región. El modelo de regresión logística se basa en la distancia de las aldeas de los bordes de la terraza, la elevación y la distancia desde el lago Titicaca. Una versión de este nuevo muestreo de superficie siempre que las limitaciones de espacio para las simulaciones de los modelos restringidos geográficamente.

El segundo problema es la extrapolación de los datos. Al usar los datos de la región de Huanacané-Putina para modelar los patrones de asentamientos en otras zonas de la cuenca, estamos extrapolando los datos más allá de sus promedios. La consecuencia más patente de este uso de los datos es la sobrestimación de la adecuación de las tierras en la cuenca sur, donde la aridez es mucho mayor que en la cuenca norte.

Los efectos de este problema son discutidos abajo, pero no parecen ser perjudiciales para el modelo.

## RESULTADOS

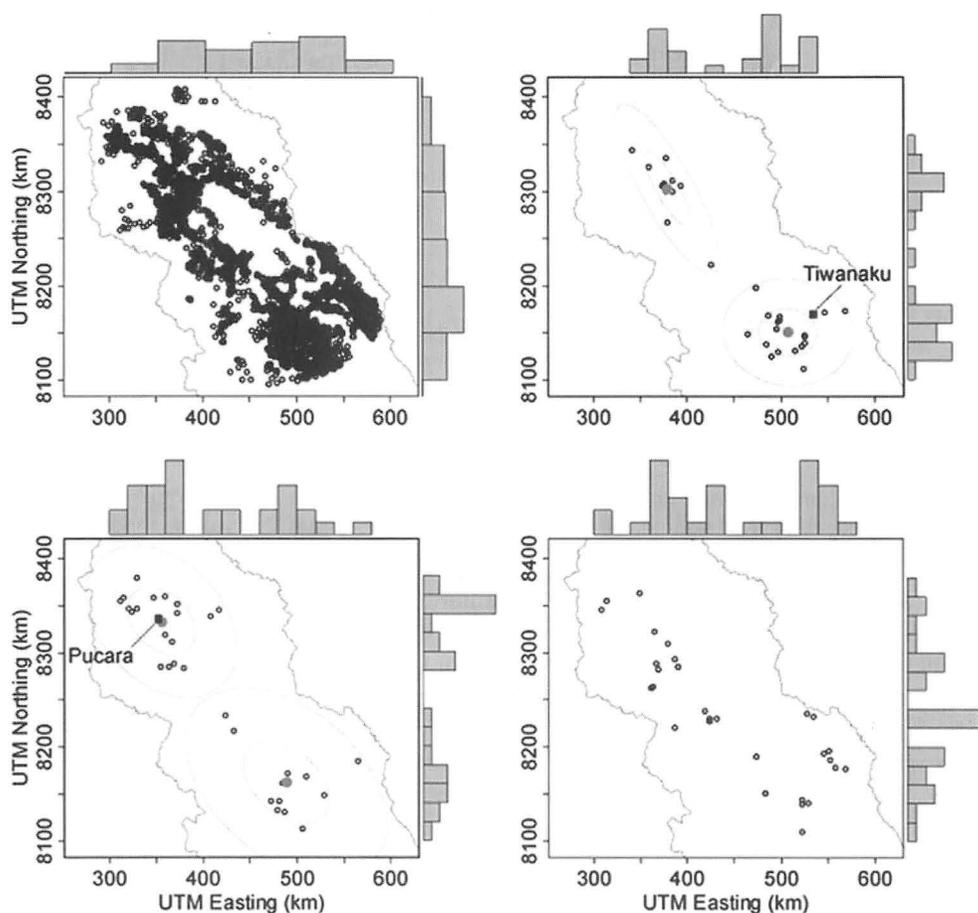
El paisaje Formativo modelado proporcionó un conjunto de limitaciones geográficas y probabilísticas sobre las ubicaciones de los agentes en nuestro modelo. La Figura 6a muestra esencialmente la geometría de este espacio modelado. Como en los modelos previos, ejecutamos 30 simulaciones, cada una con aproximadamente 1000 agentes consistente en 25 individuos cada uno. Para cada ubicación en el espacio modelado, un agente es localizado con alguna probabilidad definida por la superficie del modelo logístico. Dado el ajuste de cierre entre el modelo de gravedad y las distribuciones de tamaños empíricos en el espacio modelado genérico, elegimos a éste para definir las reglas del agente en el modelo geográfico.

Consideramos tres pruebas de ajuste del modelo con las distribuciones empíricas de asentamiento. En primer lugar, nos preguntamos qué tan buenos son los modelos para predecir las distribuciones de tamaño de asentamiento en el período Formativo de la cuenca del Titicaca. Por último, nos preguntamos qué tan bueno es el modelo para predecir las ubicaciones relativas de los dos asentamientos de rango más alto. Este último examen implica la comparación de las distancias y ángulos modelados de los asentamientos de rango 1 y 2 con los ángulos y distancias reales entre Tiwanaku y Pukara.

Encontramos que existe una coherencia entre los resultados del modelo y los datos empíricos. La distribución del tamaño de asentamiento no mostró diferencias cualitativas de aquellas generadas en los modelos de gravedad previos (ver Figuras 3 y 5). Las ubicaciones reales caen dentro de las regiones de probabilidad más alta predicha por nuestro modelo. La Figura 7 muestra los resultados del modelo para todos los sitios con población excedente, para los sitios del rango 1, los sitios del rango 2, y los sitios del rango 3 con 30 ejecuciones a tiempo 100. Los sitios modelados del rango 1 forman dos grupos, uno en el norte y uno en el sur. La mayor probabilidad de conjuntos (*cluster*) en el sur conteniendo 18 de los 30 de un rango de sitios y el agrupamiento norte contiene los restantes 12. La media geográfica del sitio predicho de rango 1 está aproximadamente a 40 km al suroeste de la ubicación de Tiwanaku. Sospechamos que este desplazamiento está, en parte, relacionado a nuestra sobreestimación de la población en la región de Desaguadero de la cuenca sur. Sin embargo, la distribución modelada del rango 1 es coherente con la ubicación real de Tiwanaku.

Los sitios modelados de rango 2 también forman dos grupos en los extremos norte y sur de la cuenca. Sin embargo, el sitio de rango 2 está sesgado hacia el extremo norte de la cuenca, con 18 sitios cayendo en el agrupamiento norte y los restantes 12 en el agrupamiento sur. El centro geográfico de los sitios modelados del rango 2 predice la ubicación de Pukara con una exactitud casi perfecta (ca. < 5 km). Los sitios modelados del rango 3, por otra parte, no exhiben el mismo grado de agrupamiento geográfico como los asentamientos del rango 1 y 2. Sin embargo, es digno de notar que la media y la moda, de la coordenada UTM, para los sitios modelados del rango 3 esta entre 8200 y 8250 km, mientras que las coordenadas para los sitios reales de 3 y 4 se ubican entre 8240 y 8260 km aproximadamente.

Esto también quiere decir que las proporciones norte-sur de los sitios modelados de rango 1 y 2 están en una oposición perfecta. La relación geográfica predicha entre los sitios modelados de rango 1 y 2 se asemejan con la relación espacial real entre

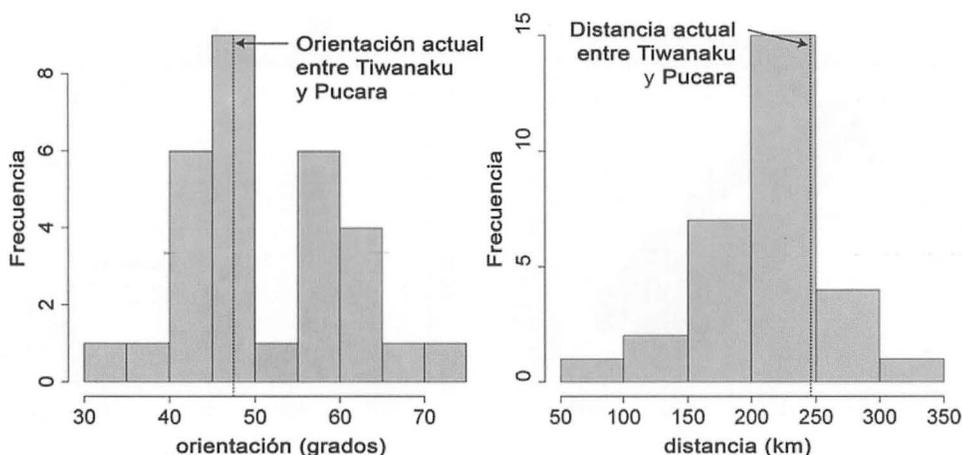


**Figura 7.** Las ubicaciones geográficas de (A) todos los sitios modelados con poblaciones finales  $> 0$ , (B) todos los sitios de rango 1, (C) todos los sitios con rango 2, y (D) todos los sitios con rango 3. Estas distribuciones se generaron en 100 pasos de tiempo. Las ubicaciones de los modelados de sitios de rango 1 se comparan con la ubicación real de Tiwanaku, y las ubicaciones de las bases de los sitios modelados 2 se comparan con la ubicación real de Pucará. Los puntos grises definen los medios geográficos de los agrupamientos o clusters que fueron definidos por *K-means*. Las líneas de puntos grises representan las elipses de error estándar de distancia 1 y 2.

Tiwanaku y Pucara (Figura 8). La orientación promedio entre los sitios modelados de rango 1 y 2 es  $51 \pm 9^\circ$  mientras que la orientación real entre Pucara y Tiwanaku es  $48^\circ$ . Además, la distancia media entre los sitios modelados de rango 1 y 2 es  $216 \pm 51$  km mientras que la distancia real entre Pucara y Tiwanaku es 247 km.

## RESUMEN Y DISCUSIÓN

Este artículo se propuso entender los procesos subyacentes a la coalescencia diferencial de la población en el período Formativo de la cuenca del Lago Titicaca, a través de



**Figura 8.** Una comparación de las actuales orientaciones de Tiwanaku-Pucará (izquierda) y las distancias (derecha) para las orientaciones de modelado y las distancias. Los valores modelados son consistentes con los valores actuales.

un examen de las distribuciones de asentamiento y modelización basada en agentes. El período Formativo de la cuenca revela las distribuciones del rango del tamaño de asentamiento que oscilan entre cóncavo y convexo con Tiwanaku y Pucará representando los centros *primate* de las distribuciones cóncavas (Albarracín-Jordan 1996; Stanish 2003). Nuestro modelo simple, basado en agentes, muestra que este rango de variación en las distribuciones de tamaño de asentamiento, puede generarse con sólo unas pocas reglas simples, incluyendo asentamientos dispersos geográficamente integrados por individuos quienes migran entre estos asentamientos con un sesgo hacia asentamientos que están relativamente cerca y/o son grandes.

El grado de este sesgo está inversamente relacionado con el grado de convexidad del rango-tamaño. Relativamente pocos grados de conexión preferencial en los alrededores de los grandes asentamientos tenderán a producir distribuciones *primate* mientras que relativamente pocos grados de adhesión tenderán a producir distribuciones convexas. Una inclinación intermedia a los sitios próximos y grandes tenderán a producir distribuciones de rango de tamaño log-lineal.

Por consiguiente, de la forma de las distribuciones de rango de tamaño de los asentamientos arqueológicos, podemos inferir la atracción de factores sociales relativos a los efectos dispersivos de los factores no sociales. Basados en la forma convexa de las distribuciones de rango de tamaño no lineal del período Formativo del valle de Tiwanaku, concluimos que la atracción de factores sociales era relativamente baja. O, inversamente, las fuerzas dispersivas de los factores no sociales fueron relativamente altas.

Basados en la forma de las distribuciones de rango de tamaño no lineal del período Formativo Superior, podemos inferir que los individuos tuvieron un mayor grado de libertad en sus decisiones para buscar oportunidades de migración motivadas socialmente. Este patrón conductual podría haber emergido inicialmente en el contexto de caravanas de llamas, en combinación con los avances tecnológicos agrícolas en el culti-

vo de campos elevados. Sin embargo, los asentamientos, cada vez más grandes, habrían sido ocupados con el aumento de tensiones que surgen del estrés de escala (Bandy 2004). De hecho, el período Formativo está marcado por el aumento de tradiciones integradas, que podrían haber respondido a las nuevas predilecciones de individuos y pequeñas comunidades migrantes. Tiwanaku, cuyo tamaño también es predicho porque, según el modelo de Griffin y Stanish (2007), la geografía parece haber sido particularmente exitosa en integrar una población particularmente grande (Janusek 2006).

El modelo presentado aquí también sugiere que el tamaño y la ubicación de los asentamientos de alto rango son fuertemente dependientes de las diferencias, aparentemente triviales, de las condiciones iniciales de la geografía. Por ejemplo, más allá del hecho que nuestros 30 modelos de funcionamiento-gravedad compartieron el mismo número de aldeas, cada una de ellas con el mismo tamaño de población inicial, las desviaciones estándares de los asentamientos del rango 1 de aproximadamente 5000 individuos y un rango de 17000 (véase Figura 5). Además, en el modelo de ejecución geográfica, las ubicaciones de los asentamientos del rango 1 estuvieron correctamente posicionados en la cuenca del sur solamente el 60% del tiempo. Se predijo que el 40% restante ocurrió en la cuenca norte, aproximadamente en los alrededores de Pukara. Nuevamente, diferencias sutiles en las condiciones iniciales crearon muy diferentes modelos de historias. Dicho esto, también es claro que ciertas historias fueron más probables que otras. En el lenguaje de los teóricos de la complejidad, tales órbitas de atracción habrían constreñido los resultados potenciales de las distribuciones de asentamiento del período Formativo de la cuenca de Titicaca.

### ***Agradecimientos***

Este trabajo fue financiado parcialmente por el Santa Fe Institute mediante una NSF Grant No. 0200500 titulada "A Broad Research Program in the Sciences of Complexity." Muchos participantes en la SFI Complex Systems Summer School ofrecieron comentarios reflexivos y valiosos que mejoraron este artículo, así como también lo hicieron James P. Holmlund (Western Mapping Company, Tucson), Shane Miller (The University of Arizona), y Taylor Hermes (The University of Arizona). Todas las fallas y confusiones, en este artículo, son responsabilidad de los autores.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Adamic, L.A. y B. A. Huberman  
2002 Zipf's Law and the Internet. *Glottometrics*, 3: 143-150.
- Albarracín-Jordan, J.  
1996 Tiwanaku settlement system: The integration of nested hierarchies in the lower Tiwanaku Valley. *Latin American Antiquity*, 7: 183-210.
- Aldenderfer, M.S.  
1989 Archaic period in the South-Central Andes. *Journal of World Prehistory*, 3: 117-158.
- Arkush, E. y M. W. Allen (Eds.)  
2006 *The archaeology of warfare: Prehistories of raiding and conquest*. University Press of Florida. Gainesville.
- Bandy, M.S.  
2004 Fissioning, scalar stress, and social evolution in early village societies. *American Anthropologist*, 106: 322-333.
- Bandy, M.S. y J. W. Janusek  
2005 Settlement patterns, administrative boundaries, and internal migration in the Early Colonial period. En Stanish, C., Cohen, A.B. y Aldenderfer, M.S. (Eds.): *Advances in Titicaca Basin Archaeology-1*: 267-288. Cotsen Institute of Archaeology at UCLA, Los Angeles.
- Berry, B.J.L.  
1961 City Size distributions and economic development. *Economic Development and Cultural Change* 9, 573-588.
- Brown, C.T. y W.R.T. Witschey  
2003 The fractal geometry of ancient Maya settlement. *Journal of Archaeological Science*, 30: 1619-1632.
- Brown, C.T., W.R.T. Witschey y L. S. Liebovitch  
2005 The broken past: Fractals in archaeology. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 12: 37-78.
- Christaller, W.  
1966 *Central places in Southern Germany*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs N.J.
- Clauset, A., C. R. Shalizi y M. E. J. Newman  
2009 Power-Law distributions in empirical data. *SIAM Review* 51(4): 661-703.
- Drennan, R.D. y C. E. Peterson  
2004 Comparing archaeological settlement systems with rank-size graphs: a measure of shape and statistical confidence. *Journal of Archaeological Science*, 31: 533-549.
- Environmental Systems Research Inc.  
2008 ArcGIS. Redlands.
- Farr, T.G., P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank y D. Alsdorf  
2007 The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys*, 45.
- Google Inc.  
2010 Google Earth. Google Inc., Mountain View.
- Griffin, A.F.  
2011 Emergence of fusion/fission cycling and self-organized criticality from a simulation model of early complex polities. *Journal of Archaeological Science*, 38: 873-883.

- Griffin, A.F. y C. Stanish  
 2007 An Agent-based model of prehistoric settlement patterns and political consolidation in the Lake Titicaca Basin of Peru and Bolivia. *Structure and Dynamics: eJournal of Anthropological and Related Sciences*, 2: 1-47.
- Gumerman, G.J., A. C. Swedlund, J. S. Dean, y J. M. Epstein  
 2003 The evolution of social behavior in the prehistoric american southwest. *Artificial Life*, 9: 435-444.
- Hamilton, M.J., B. T. Milne, R. S. Walker, y J. H. Brown.  
 2007 Nonlinear scaling of space use in human hunter-gatherers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104: 4765-4769.
- Holt, J. Z.  
 2009 Rethinking the Ramey State: was Cahokia the center of a theater state? *American Antiquity*, 74: 231-254.
- Janusek, J.W.  
 2004 Tiwanaku and its precursors recent research and emerging perspectives. *Journal of Archaeological Research*, 12: 121-183.  
 2006 The Changing 'nature' of Tiwanaku Religion and the Rise of an Andean State. *World Archaeology*, 38(3): 469-492.
- Johnson, G.A.  
 1980 Rank-Size convexity and system integration: A View from Archaeology. *Economic Geography*, 56: 234-247.
- Krugman, P.  
 1996 *The self-organizing economy*. Blackwell Publishers. Cambridge.
- Lansing, J.S.  
 2002 "Artificial societies" and the social sciences. *Artificial Life*, 8: 279-292.
- Laxton, R. y W. Cavanagh  
 1995 The rank-size dimension and the history of site structure from survey data. *Journal of Quantitative Anthropology*, 5: 327-358.
- McAndrews, T.L., J. Albarracin-Jordan y M. Bermann  
 1997 Regional settlement patterns in the Tiwanaku Valley of Bolivia. *Journal of Field Archaeology*, 24: 67-83.
- Premo, L.S.  
 2007 Exploratory agent-based models: Towards an experimental ethnoarchaeology. En Clark, J. y E. Hagemeister (Eds.): *Digital Discovery: Exploring New Frontiers in Human Heritage, Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*: 29-36. Archeolingua Press, Budapest.
- Rihll, T. y A. Wilson  
 1991 Modelling Settlement structures in ancient greece: New approaches to the polis. En Rich, J., Wallace-Hadrill, A. (Eds.): *City and Country in the Ancient World*: 58-95. Routledge. New York.
- Savage, S.H.,  
 1997 Assessing Departures from log-normality in the rank-size rule. *Journal of Archaeological Science*, 24: 233-244.
- Stanish, C.  
 2003 *Ancient Titicaca: The Evolution of complex society in Southern Peru and Northern Bolivia*. University of California Press. Berkeley.

- Stanish, C., A. B. Cohen, E. De la Vega, E. Arkush, C. Chávez, A. Plourde y C. Schultz  
2005 Archaeological reconnaissance in the northern Titicaca Basin. En Stanish, C., A. B. Cohen y M. S. Aldenderfer (Eds.): *Advances in Titicaca Basin Archaeology-1*: 289-316. Cotsen Institute of Archaeology at UCLA, Los Angeles.
- Stewart, J.Q.  
1948 Demographic gravitation: Evidence and applications. *Sociometry*, 11: 31-58.
- The R Foundation  
2009 R Statistical Computing Language. Wien.
- Tripcevich, N.  
2007 *Quarries, caravans, and routes to complexity: Prehispanic obsidian in the south-central Andes*. Tesis doctoral inédita. University of California, Santa Barbara.
- Walker, P.L.  
2001 A bioarchaeological perspective on the history of violence. *Annual Review of Anthropology*, 30: 573-596.
- Wilensky, U.  
1999 NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston.
- Zipf, G.K.  
1949 *Human behavior and the principle of least effort: An introduction to human ecology*. Addison-Wesley Press. Cambridge.