

Proyección Hotine Oblicua Mercator Lima: Propuesta de solución para la cartografía urbana de la ciudad de Lima y zona conurbada

Projection Hotine Oblique Mercator Lima: proposed solution for urban mapping the capital of Peru, Lima city and metropolitan area

Juan Alberto Ibarra Granda ¹

Para citar este artículo: Ibarra Granda J.A Proyección hotine oblicua mercator Lima: Propuesta de solución para la cartografía urbana de la ciudad de Lima y zona conurbada. Revista de Topografía Azimut. PP 19-31

Fecha de Recepción: 01 de marzo de 2014

Fecha de Aceptación: 10 de septiembre de 2014

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo de proponer la proyección Hotine Oblicua Mercator Lima (HOM LIMA) para representaciones cartográficas a grandes escalas en la capital del Perú, la ciudad de Lima, y su zona conurbada; mediante los datums World Geodetic System 1984 (WGS84-REGGEN) y Provisional South American Datum 1956 (PSAD56), que es la más conveniente a emplear porque tiene menos deformación. El sistema de proyección actual universal transversa de Mercator (UTM) no es adecuado para su representación porque presenta fuertes deformaciones en las distancias de la proyección con respecto a la del terreno; en la cual influye el factor de escala y el factor de reducción nivel medio del mar, cuyo resultado producto de estas variables es el factor de escala combinado, para ello se utilizaron imágenes de satélite gdem aster para extraer datos de alturas ortométricas, y aplicando las formulas del factor de escala combinado se realizó un análisis espacial obteniendo resultados de archivos raster con la información de las deformaciones, tanto de la UTM como la HOM LIMA para su comparación. Así mismo se hicieron cálculos para una poligonal geodésica hecha con estación total y puntos colocados con GPS diferencial para dar sustento al análisis espacial realizado. Las deformaciones en los sistemas de proyección cartográfica es importante representarlas para visualizar su comportamiento y así decidir y elegir el sistema adecuado y representarlas a grandes escalas.

Palabras clave: datum, deformación, distorsión, factor de escala, factor de escala combinado, Hotine oblicua Mercator Lima, proyección cartográfica, reducción nivel medio del mar, universal transversa de Mercator.

Abstract

This article aims to propose Hotine Oblique Mercator projection Lima (HOM LIMA) for mapping at great scales in the capital of Peru representations, the city of Lima and its conurbation; datums using the World Geodetic System 1984 (WGS84 - REGVEN) and Provisional South American Datum 1956 (PSAD56) is the right one to use because it has less deformation. Since the projection system current Universal Transverse Mercator (UTM) is not suitable for representation because it has strong deformations in the distances of the projections with respect to the land on which influences the scale factor and reduction factor mean sea level, whose product result of these variables is the combined scale factor. For this satellite image was used Gdem aster to extract data from orthometric heights, and applying the formulas combined scale factor obtaining spatial analysis results raster files with information on the deformations is done, both UTM and the HOM LIMA likewise for comparison calculations for a geodetic total station made polygon and dots placed with differential GPS to give sustenance to the spatial analysis was performed. The distortions in the map projection systems are important to represent them to visualize the behavior of them to decide and choose the right system and thus represent them at great's scales.

Keywords: datum, deformation, distortion, scale factor, combined scale factor, Hotine Oblique Mercator Lima, map projection, reduced sea level, universal Transverse Mercator.

¹Ingeniero Geografo. Florencia Caqueta. Colombia cartografo69@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El sistema de proyección cartográfica que se emplea para representar la cartografía en el Perú a diferentes escalas (desde pequeñas 1/500,000, cartas nacionales hasta grandes 1/500, por ejemplo) es la universal transversa de Mercator (UTM), cuyas husos que corresponde al país son: 17, 18 y 19; bajo los datums Provisional South American 1956 (PSAD 56) y World Geodetic System (WGS84), reglamentado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) del Perú. En la actualidad el país cuenta con la Red Geodésica Geocéntrica Nacional (REGGEN) con base a la Red Geocéntrica de las Américas (SIRGAS) que se apoya en el datum WGS 84. Anteriormente se tenía la Red Geodésica Clásica elaborada mediante mediciones astronómicas y redes de triangulación de 1°, 2°, 3° y 4° orden que se apoyaba sobre el datum local que es el PSAD 56.

La cartografía urbana de la ciudad de Lima, capital del Perú, incluyendo la zona conurbada, que está conformada solo por el espacio urbano (representada en planos de trazados de lotización, planos perimétricos, etc.) se realiza siempre bajo el sistema de proyección UTM, anteriormente con el datum PSAD 56, zona 18 donde queda ubicada; hasta que el Instituto Geográfico Nacional (IGN) del Perú, por resolución jefatural N° 079-2006-IGN-OAJ-DGC, establece oficialmente el Sistema Geodésico Nacional como la Red Geodésica Geocéntrica Nacional (REGGEN), cuyo datum es WGS 84, que está vinculada a la Red SIRGAS, para georreferenciar la cartografía nacional a diferentes escalas. Sin embargo hasta en la actualidad en la cartografía de Lima aún se emplea el datum PSAD 56 que está en periodos de conversión o transformación de coordenadas entre dichos datums. En 2008 se inicia el "Proyecto de consolidación de los derechos de propiedad inmueble" (PCDPI) que esto vinculó a las entidades

del Estado peruano como: Organismo de Formalización de Propiedad Informal (Cofopri), Superintendencia Nacional de Registros Públicos (Sunarp) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN) del Perú, para establecer estaciones de referencia permanentes GNSS (GLONASS) bajo el sistema REGGEN.

Por otro lado, en capitales de Latinoamérica, como Bogotá, Buenos Aires, Santiago de Chile y Quito, no emplean el mismo sistema de proyección de escalas pequeñas o medianas para escalas grandes para representar la cartografía urbana, debido a la fuerte distorsión o deformación que se aprecia en la distancia de esta proyección con respecto a la distancia del terreno debido al factor de escala como también el factor de reducción del nivel medio del mar, por tanto para elaborar planos perimétricos, planos de trazado de lotización, planos de obras de ingeniería, entre otros, no es recomendable el uso de dicho sistema.

Lima y la zona conurbada precisa representar su cartografía urbana para catastro urbano y fines ya mencionados, bajo un sistema de proyección local que presente menor distorsión que la UTM. Ante eso, el objetivo de la presente investigación es proponer un nuevo sistema de proyección llamado Hotine oblicua Mercator Lima (HOM LIMA), que se basa en la proyección oblicua de Mercator, pero a diferencia de la UTM en que el cilindro de proyección es transversal, envuelve la Tierra oblicuamente. En este caso el huso de esta proyección está orientado con respecto al límite de la provincia de Lima, que en su línea central (cruza por el medio de ella) el factor de escala es 1.000058873 (a diferencia de la UTM que es 0.9996), lo que permite reducir las deformaciones entre las distancias horizontales del terreno y las proyectadas. El huso abarca solamente dicho límite, porque en ella se ubica la ciudad de Lima y la zona conurbada (65 km). Al ser el huso mucho menor que la UTM (6°, equivalente a 668

km aproximadamente), el factor de escala combinado (influye el factor de reducción al nivel medio del mar y el factor de escala de la proyección) las distorsiones o deformaciones de las distancias horizontales del terreno en comparación con la proyección UTM es mucho menor y se ajusta lo mejor posible, sobre todo en las diferencias de altitudes, que no es tan uniforme su geografía. Esta proyección estará sujeta a comparaciones, análisis y demostraciones con la proyección vigente (UTM).

METODOLOGÍA

La construcción del sistema de proyección cartográfica propuesta *Hotine oblicua* Mercator Lima (HOM LIMA), se basó en el método de dos puntos que define la línea central de la proyección, dicha línea pasa por medio de la provincia de Lima; los puntos fueron ubicados en los extremos norte y sur del límite provincial, para luego obtener sus parámetros. Estos cálculos se elaboraron en los sistemas geodésicos de referencia como son los *datums* PSAD 56 y REGGEN (WGS 84), y se realizaron transformaciones de coordenadas entre ellos según las normas de levantamientos geodésicos establecidas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) del Perú. Luego se realizaron los análisis de deformaciones para ambos sistemas de proyección, HOM LIMA y UTM, en función del factor de escala de las proyecciones y el factor de reducción del nivel medio del mar (relacionado con las altitudes ortométricas), de la cual el producto de ambos es el factor de escala combinado, que se relaciona con la distancia del terreno. Para estos análisis se emplearon imágenes de satélite *aster gdem* que tienen una resolución de 30 m, y empleando el *software ArcGis 10* se extrajeron puntos con las altitudes ortométricas, que fueron colocados sobre la imagen cada 500 m en las provincias de Lima y Constitucional del Callao. Estos puntos extraídos mediante una

plantilla de Excel permitieron obtener la altura de la proyección con el fin de determinar el factor de escala de la proyección HOM LIMA. También, mediante la plantilla se hizo el cálculo de los valores del factor de escala, el factor de reducción del nivel medio de mar y el factor de escala combinado de ambos sistemas de proyección, aplicando sus respectivas formulas. Obtenido dichos resultados, se realizó un análisis espacial con el *ArcGIS 10*, mediante la interpolación por el método geoestadístico Kriging, con la finalidad de obtener un raster que representa las regiones de las deformaciones, factor de escala combinado, aplicadas en ambas proyecciones, obteniéndose que la proyección UTM no es la adecuada para la representación cartográfica de la ciudad de Lima y zona conurbada. Por último, se colocaron los puntos geodésicos tomados con estación total y GPS como sustento de las distorsiones que están dentro de las regiones de deformaciones anteriormente descritas.

DATUM

Actualmente en el Perú se emplean dos *datums* horizontales que son: Provisional South American 1956 y REGGEN (WGS84), sus parámetros se muestran en la tabla 1, y el *datum* vertical es el geoide (nivel medio del mar).

Tabla 1: Parámetros de los *datums* horizontales

Parámetro	Datum	
	PSAD 56	REGGEN (WGS 84)
Semieje mayor (a)	6 378 388 m	6 378 137 m
Semieje menor (b)	6 356 911.9462 m	6356752.3140 m
Excentricidad (e2)	0.00672267	0.00669438
Aplanamiento (f)	1/297	1/ 298.257223563

Transformación de sistemas de coordenadas entre *datums* PSAD 56 y REGGEN

Según el Proyecto de Normas Técnicas de Levantamientos Geodésicos del Instituto

Geográfico Nacional (IGN) (2005), los parámetros de conversión entre los datums REGGEN y PSAD 56 son los siguientes:

$$\Delta X = 303,55 \quad \Delta Y = -265,41 \quad \Delta Z = 358,42 \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que la cartografía urbana de la ciudad tiene como base lo elaborado por el IGN con el datum PSAD 56, se debe realizar las transformaciones respectivas de toda la información topográfica, geodésica, cartográfica y catastral al Sistema Geodésico Nacional REGGEN.

UNIVERSAL TRANSVERSA MERCATOR (UTM)

La proyección UTM es un sistema cartográfico conforme que utiliza un cilindro transversal de radio levemente menor que el de la Tierra, que corta al elipsoide haciendo que este sea secante. El elipsoide está dividido en 60 zonas o husos, cada huso cubre 6° de longitud. Los husos pueden ser ampliados máximo 30' de sus bordes extremos. El límite máximo de la aplicación de este sistema en latitud es hasta 80° sur y 84° norte. El cilindro es secante debido a las reducciones de las deformaciones que se producen en los husos o zonas; es decir, existen dos líneas secantes que son automecoicas, por tanto no existe deformación debido a que el factor de escala en dichas líneas es la unidad y distante del meridiano central aproximadamente unos 180 km o 1° 37' de diferencia de longitud. El factor de escala (coeficiente de anamorfosis o deformación lineal) en el meridiano central tiene un valor menor que la unidad igual 0.9996 (1:2,500) y en los bordes extremos del huso tiende a 1.001 (1:1000). El origen de cada huso o zona es la línea ecuatorial y el meridiano central del propio, cuyas coordenadas son 500,000 m este y 10,000,000 m norte (figura 1).

LINEA ECUATORIAL
HEMISFERIO SUR : 10 000 000 m
HEMISFERIO NORTE: 0 m

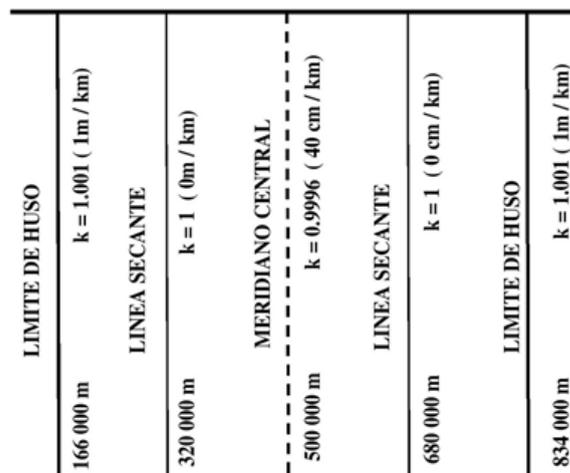


Figura 1: Escala de distorsión lineal de cualquier huso 6° cercano al Ecuador

Fuente: Rodrigues de Carvalho (1984).

Según la Agencia Cartográfica de Defensa y el Servicio Geodésico Interamericano (1985), la fórmula del factor de escala está expresada en

$$K = K_0[1 + (XVIII)q^2 + 0,00003q^4] \quad (2)$$

$$(XVIII) = (1 + e'^2 \cos^2 \phi) / 2v^2 \cdot (1/K_0^2) * 10^{12} \quad (3)$$

Donde ϕ = latitud geográfica, v radio de curvatura del primer vertical, $k_0 = 0,9996$, $q = 0,000001X'$, $X' = 500000 - X$.

Segunda excentricidad

$$e'^2 = e^2 / (1 - e^2) \quad (4)$$

El Perú abarca los husos 17, 18 y 19. La ciudad de Lima y la zona conurbada (espacio urbano) está ubicada en las provincias de Lima y Constitucional del Callao (que conforman el área metropolitana que está dividida en 49 distritos). La ciudad está en el huso 18, en los meridianos 76° 37' W y 77°15'W y los paralelos 11°35' S y 12°32' S Tiene una extensión de 982 km² (figura 2).

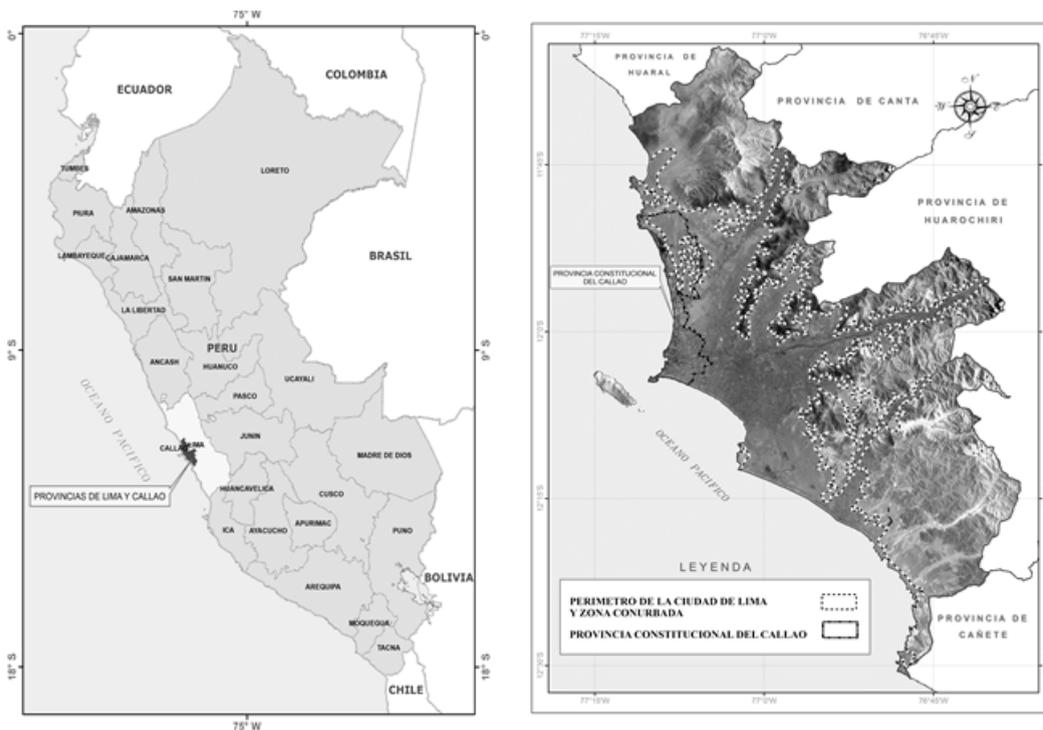


Figura 2: Ubicación de la ciudad de Lima

Fuente: INEI, DNU, Ministerio de Vivienda e imágenes de satélite landsat.

HOTINE OBLICUA MERCATOR LIMA (HOM LIMA)

La proyección *Hotine oblicua Mercator* consiste en la rotación oblicua del cilindro de la proyección Mercator, y se construyó debido a la orientación de las áreas a representar que no están necesariamente en el sentido norte-sur o este-oeste. Según Snyder (1987) se caracteriza por:

- Es conforme.
- Hay dos meridianos separados 180° que son líneas rectas.
- Los otros paralelos y meridianos son curvas complejas.
- En su forma esférica se conserva la escala a lo largo de la línea central, y en su forma elipsoidal es similar.

- La escala se hace infinito a 90° de la línea central.

Las fórmulas elaboradas por el geodesta británico Martin Hotine, están en base al elipsoide cuyas coordenadas rectangulares (u,v) están en función de los ejes U y V (figura 3); u se incrementa hacia el este a partir del origen de la línea central, mientras que v se incrementa en dirección sur perpendicular a dicha línea. Para representarlas en coordenadas (x,y), es decir este y norte, se calculan en función de las coordenadas (u,v) y el azimut verdadero de la línea central que pasa por el centro de la proyección (α_C). Esta transformación ortogonal se denomina ortomórfica sesgada rectificadora, con el eje Y, siguiendo el meridiano que pasa por el punto central e incrementándose en la dirección norte;

mientras que el eje X está situado en la dirección este oeste que pasa por dicho punto. El origen de las coordenadas (u,v) es aproximadamente la intersección de la línea central con el Ecuador, es decir, debido a que la proyección es oblicua, el Ecuador proyectado es la curva local en el elipsoide representado sobre una superficie conforme de curvatura gaussiana total llamada apósfera; ahí se intercepta con la línea central, para después ser representado en el plano (Enríquez, 2007).

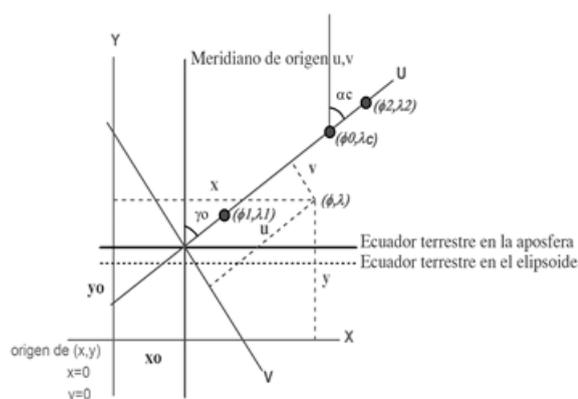


Figura 3: Sistema de coordenadas Hotine oblicua Mercator

Fuente: US geological survey, Snyder (1987).

Donde:

- ϕ_0 = latitud seleccionada en el centro de la proyección
- λ_0 = longitud seleccionada en el centro de la proyección
- (ϕ_1, λ_1) = latitud y longitud del primer punto situado en la línea central
- (ϕ_2, λ_2) = latitud y longitud del segundo punto situado en la línea central
- (ϕ, λ) = latitud y longitud del punto para el que se desean las coordenadas
- (x_0, y_0) = coordenadas de origen
- γ_0 = orientación de la línea central

α_C = azimut verdadero de la línea central que pasa por el centro de la proyección

En el área de las provincias de Lima y Constitucional del Callao (que conforman el área metropolitana) donde está ubicada la ciudad de Lima y zona conurbada se genera la línea central en el medio de la provincia de Lima y aproximadamente paralela al litoral del océano Pacífico y la dirección de la cordillera de los Andes.

Para desarrollar los parámetros de la proyección Hotine oblicua de Mercator Lima –debido a que el área de la provincia de Lima no es grande– se usó el método de seleccionar dos puntos de la línea central y definir las coordenadas de dichos puntos P1 y P2 (figura 4), en los extremos norte y sur del límite provincial para calcular las constantes. Esta línea central sería como un meridiano central de dicho huso girado y cuyo factor de escala es 1.000058873, que se determinó empleando la altitud, esto quiere decir elegir una altura para la proyección, cuyo valor es de 375 m de altitud, obteniéndose un factor de reducción por el nivel medio del mar de 0.9999411305, y dividiendo $1/0.9999411305$ se obtuvo este valor del factor de escala de la proyección. La razón de elegirlo fue minimizar las deformaciones entre las distancias del terreno y las proyectadas hasta valores entre 0 y 15 cm/km, teniendo en cuenta que la diferencia de altura del área de la ciudad y conurbación es aproximadamente 1,100 m de altitud. El factor de escala de la proyección aumenta en ambos lado de la línea central teniendo el valor de los extremos del huso en 1.000071 es decir una distorsión de 7.1 cm/km. Las coordenadas de origen se encuentran en el punto central de la proyección. Los parámetros de la proyección se pueden apreciar en la tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de la proyección Hotine oblicua Mercator Lima (HOM LIMA)

Parámetros de la Proyección HOM LIMA	PSAD 56	REGGEN (WGS84)
Latitud del centro de la proyección (ϕ_0)	12°01'26.28406"S	12°01'38.69845"S
Latitud del primer punto de la línea central (ϕ_1)	11°39'20.20206"S	11°39'32.59456"S
Longitud del primer punto de la línea central (λ_1)	77°08'40.736321"W	77°08'48.55711"W
Latitud del segundo punto de la línea central (ϕ_2)	12°23'32.46606"S	12°23'44.9023"S
Longitud del segundo punto de la línea central (λ_2)	76°43'48.4862864"W	76°43'56.25004"W
Factor de escala	1.000058873	1.000058873
Falso este (centro de la proyección)	289 033.959 m	288 809.3528 M
Falso norte (centro de la proyección)	8 670 037.404 m	8 669 669.519 M

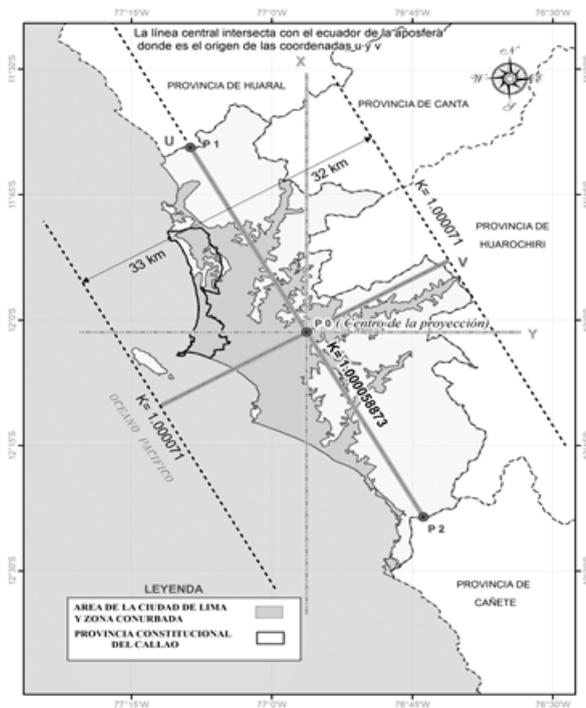


Figura 4: Sistema de proyección Hotine oblicua Mercator Lima (HOM LIMA)

K_0 = factor de escala en el centro de la proyección, asentado en la línea central
 ϕ_0 = latitud del centro seleccionado del mapa
 (ϕ_1, λ_1) = latitud y longitud (al este de Greenwich es positivo) del primer punto
 (ϕ_2, λ_2) = latitud y longitud del segundo punto que debe situarse en la línea central
 (ϕ, λ) = latitud y longitud del punto para el cual se desean las coordenadas.

Fórmulas aplicadas en la proyección HOM LIMA

Teniendo los datos de los parámetros de la proyección HOM LIMA, las fórmulas a mostrar son las mismas que se aplican en una proyección Hotine oblicua de Mercator en el elipsoide, elaboradas por el geodesta británico Martin Hotine. (Snyder, 1987).

a) Transformación de coordenadas geográficas a HOM LIMA (T4)

a y e , semieje mayor y excentricidad del elipsoide.

$$B = [1 + e^2 \cos^4 \phi_0 / (1 - e^2)]^{1/2} \quad (5)$$

$$A = \alpha B k_0 (1 - e^2)^{1/2} / (1 - e^2 \sin^2 \phi_0) \quad (6)$$

$$t_0 = \tan(\pi/4 - \phi_0/2) / [(1 - e \sin \phi_0) / (1 + e \sin \phi_0)]^{e/2}$$

$$= \left[\left(\frac{1 - \sin \phi_0}{1 + \sin \phi_0} \right) \left(\frac{1 + e \sin \phi_0}{1 - e \sin \phi_0} \right)^e \right]^{1/2} \quad (7)$$

t_1 = igual que (7), usando ϕ_1 en vez de ϕ_0

t_2 = igual que (7), usando ϕ_2 en vez de ϕ_0

$$D = B(1 - e^2)^{1/2} / [\cos \phi_0 (1 - e^2 \sin^2 \phi_0)^{1/2}] \quad (8)$$

$$E = [D \pm (D^2 - 1)^{1/2}] t_0^B \quad (9)$$

tomando la variable de ϕ_0

$$H = t_1^B \quad (10)$$

$$L = t_2^B \quad (11)$$

$$F = E/H \quad (12)$$

$$G = (F - 1/F)/2 \quad (13)$$

$$J = (E^2 - LH)/(E^2 + LH) \quad (14)$$

$$P = (L - H)/(L + H) \quad (15)$$

$$\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2)/2 - \arctan[J \tan[B(\lambda_1 - \lambda_2)/2]/P]/B \quad (16)$$

$$\gamma_0 = \arctan[\sin[B(\lambda_1 - \lambda_0)]]/G \quad (17)$$

$$\alpha_c = \arcsin[D \sin \gamma_0] \quad (18)$$

t = igual que en la ecuación (7), pero usando ϕ en vez de ϕ_0

$$Q = E/t^B \quad (19)$$

$$S = (Q - 1/Q)/2 \quad (20)$$

$$T = (Q + 1/Q)/2 \quad (21)$$

$$V = \sin[B(\lambda - \lambda_0)] \quad (22)$$

$$U = (-V \cos \gamma_0 + S \sin \gamma_0)/T \quad (23)$$

$$v = A \ln[(1 - U)/(1 + U)]/2B \quad (24)$$

$$u = A \arctan[(S \cos \gamma_0 + V \sin \gamma_0) / \cos[B(\lambda - \lambda_0)]]/B \quad (25)$$

Si se desea las coordenadas “rectificadas” (x , y), con el origen a una distancia (x_0, y_0) del origen de las coordenadas (u, v) , con relación a los ejes (X, Y) :

$$x = v \cos \alpha_c + u \sin \alpha_c + x_0 \quad (26)$$

$$y = u \cos \alpha_c - v \sin \alpha_c + y_0 \quad (27)$$

b) Transformación de coordenadas HOM LIMA a geográficas (T4)

Para determinar ϕ y λ desde x e y o desde u y v , las constantes de la proyección son halladas desde las ecuaciones anteriores (5) a (18). Entonces, si x y y se dan de acuerdo con las definiciones para las ecuaciones siguientes, primero tienen que ser convertidos a (u, v) :

$$v = (x - x_0) \cos \alpha_c - (y - y_0) \sin \alpha_c \quad (28)$$

$$u = (y - y_0) \cos \alpha_c + (x - x_0) \sin \alpha_c \quad (29)$$

Si se dan (u, v) , o son calculados como antes, los siguientes pasos se realizan en orden:

$$Q' = e^{-(Bv/A)} \quad (30)$$

Donde $e = 2.71828\dots$, la base de los logaritmos naturales.

$$S' = (Q' - 1/Q')/2 \quad (31)$$

$$T' = (Q' + 1/Q')/2 \quad (32)$$

$$V' = \sin(Bu/A) \quad (33)$$

$$U' = (V' \cos \gamma_0 + S' \sin \gamma_0)/T \quad (34)$$

$$t = [E/[(1 + U')/(1 - U)]^{1/2}]^{1/B} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \phi = X + (e^2/2 + 5e^4/24 + e^6/12 + 13e^8/360 + \\ \dots) \sin 2X + (7e^4/48 + 29e^6/240 + \\ 811e^8/11520 + \dots) \sin 4X + (7e^6/120 + \\ 81e^8/1120 + \dots) \sin 6X + (4279e^8/161280 + \\ \dots) \sin 8X + \dots \end{aligned} \quad (36)$$

$$\lambda = \lambda_0 - \arctan[(S' \cos \gamma_0 - V' \sin \gamma_0) / \cos(Bu/A)]/B \quad (37)$$

Donde:

$$X = \pi/2 - 2 \arctan t \quad (38)$$

c) Factor de escala (k) (T4)

$$k = A \cos(Bu/A)(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2} / [a \cos \phi \cos[B(\lambda - \lambda_0)]] \quad (39)$$

Factor de reducción nivel medio del mar

Este factor está ligado con las alturas ortométricas que están referidas al nivel medio del mar, el cual permite obtener con el factor de escala de la proyección el llamado *factor de escala combinado* que es la relación entre la distancia de la proyección y la distancia horizontal del terreno, donde se hacen mediciones sobre la superficie de la Tierra y no en el geode. La fórmula del factor de reducción al nivel medio del mar está expresada por la formula (40):

$$F_r = 1 - (157 * (\Delta h) * 10^{-9}) \quad (40)$$

donde Δh es la diferencia de alturas ortométricas entre dos puntos. El área de la ciudad de Lima y zona conurbada tiene alturas ortométricas que oscilan entre 0 y 1,100 m de

altitud aproximadamente como se indica en la figura 5.

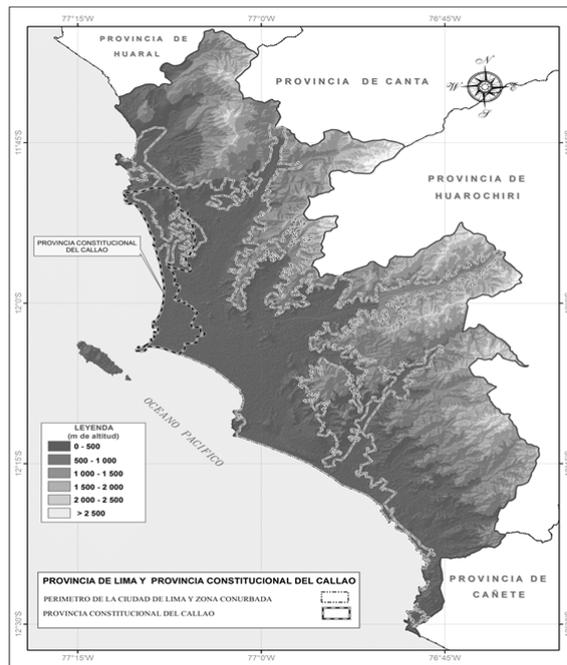


Figura 5: Mapa de altitudes ortométricas

Fuente: imágenes Aster Gdem (Earth Explorer, 2011).

RESULTADOS

Deformación en la proyección UTM

En la figura 6, se aprecia la deformación entre la distancias horizontales del terreno y las distancias UTM, en el área de la ciudad de Lima, y la zona conurbada fluctúa entre 0 a más de 25 cm/km; la mayor deformación se aprecia en las zonas de pendientes planas y cercanas al mar. Por otro lado hay deformaciones no muy grandes, que se encuentran entre 0 y 15 cm/km, pero su recubrimiento es poco al área de la ciudad. Se observa también que el lado derecho de la región 0-5 cm/km, el factor de escala combinado decrece, mientras que al lado izquierdo aumenta, esto quiere decir que cuando el factor de escala combinado es mayor de 1 las distancias UTM son mayores

que las horizontales del terreno; en caso contrario son menores, la deformación tiende a crecer en ambas direcciones, al este y al oeste del factor de escala combinado 1.

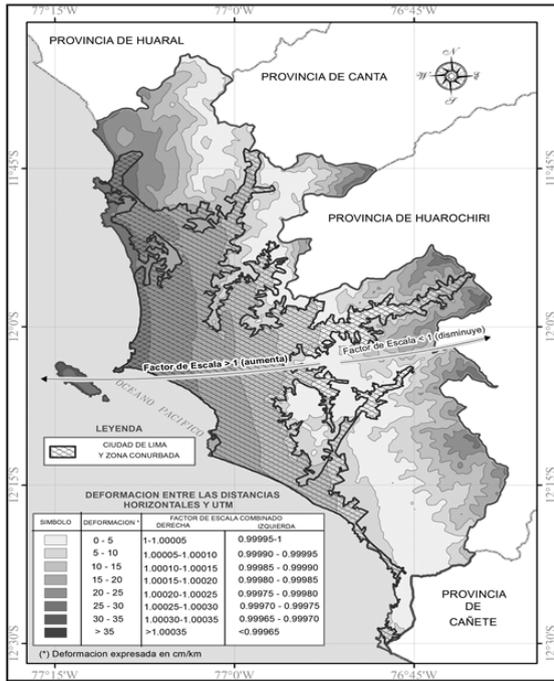


Figura 6: Mapa de factor de escala combinado UTM

Deformación en la proyección HOM LIMA

La deformación en la proyección por influencia de la altitud ortométrica muestra otro comportamiento, pero la alteración se mantiene sin mayores deformaciones en el área conurbada de la ciudad de Lima, a diferencia de la proyección UTM que es mínima y fluctúa aproximadamente los valores entre 0 y 15 cm/km, la razón es la altura de la proyección HOM LIMA que es 375 m, donde el factor de escala combinado es 1, la deformación es 0 cm/km, y el valor más alto de deformación (15 cm/km) se debe a la altura que se encuentra aproximadamente 1,100 m de altitud. El recubrimiento de las deformaciones entre esos valores en el área es total debido a que el factor de escala combinado está en función de la proyección en ambos lados de la línea central. Las

deformaciones en zonas de pendientes planas a moderadas y cercanas al mar a diferencia de la UTM que se encuentran entre 15-25 cm/km, allí fluctúa entre 0 y 7 cm/km aproximadamente. Las distancias horizontales del terreno son menores que las distancias HOM LIMA, a partir de 375 m de altitud, cuyo factor de escala combinado es 1, a medida que la altura va descendiendo, el factor de escala combinado aumenta, lo contrario sucede cuando aumenta la altitud el factor de escala combinado decrece y las distancias de la proyección son menores que las distancias horizontales del terreno (figura 7).

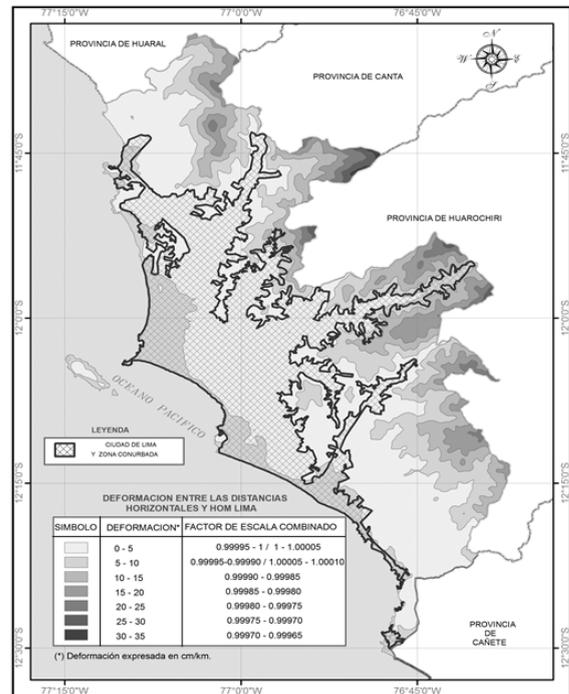


Figura 7: Mapa de deformación HOM LIMA factor de escala combinado

Tabla 3: Coordenadas de puntos de control de la poligonal geodésica de Pampas de Ancón (zona norte del área conurbada), elaborado con equipo de estación total. Datum: PSAD 56

Nombres	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM		Coordenadas HOM LIMA		Altitud Ortométrica (m)
	Latitud	Longitud	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	
Loma de Ancón	11°41'52.636"S	77°09'10.758"W	265 309.550	8 705 936.460	265 563.320	8 706 094.884	750.26
E-2	11°42'7.6024"S	77°09'17.3052"W	265 114.719	8 705 474.942	265 365.382	8 705 634.813	696.041
E-3	11°42'55.0574"S	77°09'17.2024"W	265 128.968	8 704 016.391	265 369.627	8 704 176.525	507.075
E-4	11°43'15.7023"S	77°09'17.9189"W	265 112.116	8 703 381.685	265 348.423	8 703 542.091	446.207
E-5	11°43'58.7313"S	77°09'1.7878"W	265 610.827	8 702 062.879	265 837.953	8 702 220.184	190.884
E-6	11°44'34.3780"S	77°09'13.4465"W	265 266.079	8 700 964.544	265 485.738	8 701 124.489	127.83
E-7	11°45'38.0329"S	77°09'15.9618"W	265 204.885	8 699 007.464	265 411.087	8 699 168.311	58.671
E-8	11°46'26.4583"S	77°09'28.1036"W	264 848.597	8 697 516.232	265 044.606	8 697 679.905	40.143
E-9	11°46'41.2388"S	77°09'19.7653"W	265 104.608	8 697 063.877	265 297.434	8 697 225.895	36.547
VANGUARD	11°46'24.097"S	77°08'52.415"W	265 928.860	8 697 597.100	266 125.155	8 697 753.300	49.31

Tabla 4: Comparación de distancias de las proyecciones UTM y HOM LIMA con las distancias horizontales del terreno de la poligonal de Pampas de Ancón

Lados	Distancia					Proyección utm			Proyección hom lima		
	Geodésica (m)	Horizontal (terreno) (m)	UTM (m)	HOM lima (m)	Reducción nivel Medio del mar	Factor escala	Factor escala Combinado	Dif distancia Horizontal (m)	Factor escala	Factor escala Combinado	Dif Horizontal (m)
Loma de Ancón - E2	500.814	500.871	500.957	500.844	0.99988647	1.00028567	1.000172099	0.086	1.00005901	0.99994546	-0.027
E2 - E3	1 458.208	1 458.346	1 458.621	1 458.294	0.99990556	1.00028290	1.000188433	0.275	1.00005905	0.99996460	-0.052
E3 - E4	634.751	634.798	634.930	634.788	0.99992517	1.00028254	1.000207689	0.132	1.00005911	0.99998427	-0.010
E4 - E5	1 409.554	1 409.625	1 409.951	1 409.637	0.99994999	1.00028145	1.000231424	0.326	1.00005913	1.00000912	0.013
E5 - E6	1 150.846	1 150.875	1 151.169	1 150.914	0.99997498	1.00028085	1.000255822	0.294	1.00005920	1.00003418	0.039
E6 - E7	1 957.486	1 957.514	1 958.037	1 957.602	0.99998536	1.00028155	1.000266904	0.522	1.00005933	1.00004469	0.087
E7 - E8	1 532.769	1 532.781	1 533.203	1 532.860	0.99999224	1.00028338	1.000275618	0.422	1.00005950	1.00005174	0.079
E8 - E9	519.629	519.632	519.776	519.660	0.99999398	1.00028167	1.000275652	0.143	1.00005959	1.00005357	0.028
E9 - VANGUARD	981.409	981.416	981.691	981.467	0.99999326	1.00028775	1.000281012	0.276	1.00005950	1.0000528	0.052

Tabla 5: Coordenadas de puntos de control elaborados por equipo GPS diferencial en la quebrada Manchay, distrito de Pachacamac (zona sur este del área conurbada). Datum: REGGEN (WGS 84). (*) Coordenadas geográficas, coordenadas UTM y altura ortométrica, obtenidas de Aquateam Ingenieros SAC (2009)

Puntos de Control(*)	Coordenadas Geográficas(*)		Coordenadas UTM (*)		Coordenadas HOM LIMA		Altura Ortométrica (*) m de altitud
	Latitud	Longitud	Este m	Norte m	Este m	Norte	
31H	12°07'54.760322"S	76°52'18.881459"W	296 291.745	8 658 163.962	296 209.466	8 658 112.070	309.707
BMPMP5	12°07'9.670108"S	76°52'21.279482"W	296 209.715	8 659 549.152	296 137.296	8 659 497.733	345.644

Coordenadas geográficas, coordenadas UTM y altura ortométrica, obtenidas de Aquateam Ingenieros SAC (2009).

Tabla 6: Comparación de distancias de las proyecciones UTM y HOM LIMA con las distancias horizontales del terreno de los puntos de control ubicados en la quebrada de Manchay, distrito de Pachacamac

Lados	Distancia					Proyección UTM			Proyección HOM Lima		
	Geodésica (m)	Horizontal (terreno) (m)	Utm (m)	Hom lima (m)	Reducción nivel Medio del mar	Factor escala	Factor escala Combinado	Dif distancia Horizontal(m)	Factor escala	Factor escala Combinado	Dif distancia Horizontal(m)
31H-BMPMP5	1 387.459	1 387.530	1 387.617	1 387.541	0.99994856	1.00011363	1.00006218	0.086	1.00005888	1.00000743	0.011

CONCLUSIONES

La proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) abarca dentro del huso 18 la Ciudad de Lima y su zona conurbada,

a pesar de que hay áreas que cubre con deformaciones de 0 a 15 cm/km; sin embargo no abarca en su totalidad, y las deformaciones van aumentando fuertemente llegando hasta más de 25 cm/km en zonas de pendiente

plana y cerca del mar. Por tal motivo no es adecuado para la representación cartográfica, ni se puede mantener esa proyección para escalas grandes, como expresó Rodrigues de Carvalho (1984): “Pretender mantener la proyección UTM simplemente por motivo de uniformidad en el territorio nacional nos parece lo mismo que querer adoptar el alcohol como combustible para todos los vehículos, desde el avión hasta pequeños motores” (p. 25).

Si bien es cierto que la proyección HOM LIMA minimiza mucho las distorsiones y es bien empleada para escalas grandes como urbano, en las partes donde se aprecia el aumento de la distorsión como se dijo hasta 15 cm/km, es debido a la altitud que tiene la ciudad y su conurbación, que tiene una diferencia promedio aproximada de 1,100 m de altitud, por lo cual no hay una proyección adecuada que satisfaga en aminorar más la distorsión, como ocurre en otras ciudades latinoamericanas que sus diferencias altitudinales satisfacen en minimizar las deformaciones menor que el valor mencionado debido a que su expansión urbana queda ubicada en una topografía del terreno que no tiene mucha diferencia a la altitud promedio de sus proyecciones, por ejemplo en Santiago de Chile, Bogotá, Buenos Aires y Quito. Para ello, una alternativa es realizar un plano topográfico local (PTL), que consiste en emplear la proyección HOM LIMA con la diferencia de solo cambiar el factor de escala de la proyección que es 1.000058873, por un factor de escala combinado obtenido de la altitud promedio de la zona a levantar, que sea mayor de 1; pero la georreferenciación final es en la HOM LIMA. Este sistema de proyección puede ser empleado para ambos datums sea PSAD 56 o REGGEN (WGS 84), en las estaciones de referencia permanente GNSS (ERP), y aplicado no solo en la zona conurbada de la ciudad de Lima, sino también en las provincias de Lima y Constitucional del Callao que conforman el área metropolitana.

El método de la proyección HOM LIMA, elaborado a partir de la línea central a través de dos puntos, es muy escaso en su uso, a diferencia del método con base en la línea central construida por un punto central y azimut de la misma que es aplicada en otros lugares, por ejemplo en países como Madagascar, Suiza, Alaska, Borneo, Malasia, Hungría entre otros. Sin embargo, es eficaz para aplicarlo en áreas pequeñas como la ciudad de Lima y orientarlo de acuerdo con las características geográficas a representar la línea central sin la necesidad de hacerlo con referencia a los meridianos o paralelos geográficos permitiendo obtener precisiones óptimas para representaciones a grandes escalas que el sistema de proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) como se apreció en los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Cartográfica de Defensa, Servicio Geodésico Interamericano (1985). Curso de Cómputos Geodésicos de Oficina. Material de referencia. Escuela Cartográfica. Departamento de Geodesia / Levantamientos de campo.
- Aquateam Ingenieros SAC (2009). Ampliación de Redes Secundaria de Agua Potable y Alcantarillado para la Quebrada de Manchay – Distrito de Pachacamac-Memoria Descriptiva. Anexo I: Estudio Topográfico, SEDAPAL. Recuperado de: <https://www.yumpu.com/es/document/view/14067527/estudio-topograficopdf-sedapalcompe/3>
- Earth Explorer (2011). U.S. Geological Survey. Imágenes de satélite Aster Gdem versión 2. [En línea]. Recuperado el 12 de abril de 2016 de: <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Earth Explorer (2011). U.S. Geological Survey. Imágenes de satélite Landsat 4-5 TM. [En

- línea]. Recuperado el 17 de agosto de 2013 de: <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Enríquez T., C. (2009). Desarrollo de nuevos algoritmos para el cálculo de la proyección Gauss – Krügger. Tesis doctoral (Geodesia y Geomática). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. Ingenieros Agrónomos.
- Evolución urbana de la ciudad de Lima. Perú, Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, Dirección Nacional de Urbanismo. Escala 1: 200000. Lima, Perú, MVCS. 2010. 1 plano, 48 x 63 cms.
- Geoservidor (2007). Límite provincial. Perú Ministerio del Ambiente 2013 de: Recuperado el 31 de enero de: <http://geoservidor.minam.gob.pe/geoservidor/download.aspx>
- Instituto Geográfico Nacional de Perú (2005). Proyecto de Normas Técnicas de Levantamientos Geodésicos. Lima: Dirección de Geodesia.
- Rodrigues de Carvalho, F. (1984), Cadastro Geoambiental Polivalente (CGP) Projeção TM (conforme de Gauss). Informativo Comissão Cartográfica, VI (CGP -04).Presidência da Republica, Secretaria de Planejamento.
- Snyder J., P. (1987). Map Projection– A Working Manual by U.S. Geological Survey. Geological Survey Bulletin, 1532. Washington: U.S. Government Printing Office.