



Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE DEMORA EN RUTAS PEDESTRES: COMPARACIÓN DE ALGORITMOS

JOAQUÍN MÁRQUEZ PÉREZ¹, ISMAEL VALLEJO VILLALTA², JOSE IGNACIO ÁLVAREZ
FRANCOSO³

Dpto. de Geografía Física y AGR. Universidad de Sevilla
C/ María de Padilla s/n 41004. Sevilla, España

jmarper@us.es ivallejo@us.es jose_afra@yahoo.es

RESUMEN

La estimación del tiempo de duración de un recorrido a pie requiere la consideración de múltiples factores, entre los que destacan longitud y pendiente. La revisión bibliográfica presenta distintos métodos y funciones matemáticas para la realización del cálculo con solo estos dos parámetros y, sin embargo, no son frecuentes los trabajos en que se comparan estos procedimientos entre sí y, menos aún, los que tienen como objetivo conocer si alguno de ellos puede llegar a considerarse el más adecuado en general, o incluso en unas circunstancias determinadas. Con esta idea han sido aquí aplicados seis métodos distintos para calcular el tiempo de demora en una serie de senderos de uso público del Parque Natural de la Sierra de Grazalema y sus resultados han sido comparados con datos procedentes de distintos tipos de observaciones; como consecuencia, se presentan evidencias de que dos de los procedimientos de cálculo se muestran más eficaces que los restantes.

Palabras clave: sendero, tiempo de recorrido, modelos digitales de elevaciones, pendiente

ESTIMATED TIME DELAY IN PEDESTRIAN ROUTES: COMPARISON OF ALGORITHMS

ABSTRACT

Estimating the duration of a walking tour requires the consideration of several factors among which length and slope stand out. The literature review presents different methods and mathematical functions for performing the calculation using only these two parameters, however, works in which these procedures are contrasted are not at all frequent, and even scarcer the ones that aim to know if any of them may be seen as the most appropriate in general, or even in certain circumstances. With this in mind here are six different methods applied to estimate the delay on a number of paths for public use of the Natural Park of the Sierra de Grazalema, and their results have

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

been compared with data from different types of observations. As a result, evidence that two of the computational procedures are more effective than the rest is presented.

Keywords: path, travel time, digital elevation models, slope

1. Introducción

A pesar del incremento actual de medios de locomoción terrestre, que facilitan un rápido y cómodo transporte en distancias medias y largas, el desplazamiento pedestre sigue siendo necesario tanto en distancias cortas como en recorridos en los que no es posible utilizar otro medio; más aún, el mero hecho de andar se ha vuelto importante para individuos pertenecientes a sociedades urbanas, donde el ejercicio físico se ha convertido para muchos en una necesidad. El vuelco de esta actividad a lugares con una mayor impronta natural ha supuesto en los últimos años un notable aumento de las actividades vinculadas al senderismo en sentido amplio, con repercusiones muy importantes, entre otros ámbitos, en el desarrollo local o en la diversificación de actividades en las áreas rurales y de montaña (FEDME, 2012; MAGRAMA, 2014). En estos casos, la posibilidad de desplazamiento para personas no habituadas al mundo rural se reduce, en gran medida y por seguridad, a las redes de caminos y senderos, lo que conlleva un necesario incremento de los esfuerzos de diseño, mantenimiento y gestión de dichas redes. Entre los elementos a considerar en esta gestión, el tiempo de recorrido es una de las informaciones clave, pues permite tomar decisiones tanto a encargados de su creación y mantenimiento como a los propios usuarios y es precisamente este dato el que, por su naturaleza sutil, es más complejo de precisar.

En la resolución de problemas relacionados con el tiempo de desplazamiento a pie por vías de comunicación terrestres, longitud y velocidad son los elementos clave. Si se estima como correcta la longitud medida de una ruta, el tiempo requerido para recorrerla solo dependerá de la velocidad empleada. La velocidad óptima para caminar es aquella que supone un coste metabólico mínimo (Saibene y Minetti, 2002) y su valor está en función de una gran variedad de factores y circunstancias, entre los que se encuentran las características físicas del individuo (estado de forma, altura, edad, sexo); las psicológicas (experiencia, conocimiento del terreno); las relativas a la ruta (estado de la vía, tipo de firme, pendiente, obstáculos encontrados) o las meteorológicas, sin olvidar los límites que impone la duración del desplazamiento debido a la fatiga. Por estas razones, el cálculo del tiempo empleado en realizar una determinada ruta pedestre es una labor compleja, en la que los resultados obtenidos dependen del modo en que sean consideradas las variables anteriormente indicadas, y su valoración depende de los datos con que sean contrastados.

Entre los factores implicados en el cálculo del tiempo de demora, la inclinación del terreno se erige como una de las variables clave, pues su magnitud y sentido influyen en el coste metabólico invertido: para un caminante, afrontar una pendiente positiva (ascender) supone un esfuerzo mayor que caminar sobre una superficie plana, mientras que desplazarse por una pendiente negativa (descender) requiere un esfuerzo que puede ser menor, igual o superior al de su homóloga positiva, dependiendo de su gradiente, pues a partir de determinado valor consume más energía ir cuesta abajo que cuesta arriba (Llobera y Sluckin, 2002); en cualquier caso, fuertes pendientes, en

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, nº 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

cualquiera de los dos sentidos, incrementan de modo notable el gasto energético, hasta llegar a límites en los que caminar se vuelve imposible.

Conocer con antelación cuánto tiempo demora un recorrido suele depender de la información publicada sobre el mismo, de la experiencia de quienes ya lo han realizado o de si el sendero está dotado de señales en los que se muestre este dato; sin embargo, también es posible realizar un cálculo previo y, para ello, la revisión bibliográfica presenta determinados métodos matemáticos que, por lo general, proporcionan resultados relativamente diferentes; este hecho, unido a la falta de coincidencia sobre tiempos medidos en un mismo sendero, justifica un estudio más profundo y detallado de esta cuestión.

En este trabajo se analizan seis funciones destinadas a calcular la velocidad de desplazamiento pedestre considerando tan solo la longitud del trayecto y su pendiente (magnitud y sentido); cada método es aplicado a una selección de senderos pertenecientes al Parque Natural de la Sierra de Grazalema (Cádiz), con la idea de estimar su tiempo de recorrido, y los resultados obtenidos son comparados con dos tipos de datos: los publicados por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía y estadísticos derivados de los procedentes de una conocida página *web* destinada a recoger información aportada por los propios senderistas sobre la ruta realizada, *Wikiloc*¹.

El artículo se estructura en ocho apartados: en el primero se indican los principales antecedentes que en la revisión bibliográfica versan sobre esta cuestión; en el segundo se describen las características del área de estudio y de sus senderos; el tercero abarca el estado de la cuestión, donde se describe de forma somera las características de los principales métodos y funciones de cálculo; en el cuarto se indican los objetivos específicos de este trabajo; el quinto desarrolla la metodología seguida para alcanzar los objetivos indicados, mientras que el sexto muestra los resultados logrados; en el séptimo capítulo se abren diferentes líneas de discusión y en el octavo y último se sintetizan las principales conclusiones obtenidas.

2. Área de estudio y fuentes de información

El Parque Natural de Grazalema se encuentra entre las provincias de Cádiz (NE) y Málaga (NO) y constituye el macizo occidental más importante de las cordilleras subbéticas; creado en 1985, su extensión supera las 53.000 Has, su altitud oscila entre los 250 y 1.654 m; su naturaleza caliza, junto a una intensa pluviosidad, ha originado en él un paisaje kárstico con escarpes, cornisas, grutas, cuevas y gargantas; la vegetación la forman principalmente quejigos, encinas y alcornocales, aunque es un tipo de abeto –el pinsapo– el elemento más emblemático, pues se trata de una reliquia vegetal del periodo terciario.

En el interior del parque se encuentran diversos senderos, de los que veinte están catalogados de Uso Público por la Consejería correspondiente de la Junta de Andalucía; estos senderos no solo están debidamente acondicionados y señalizados, sino que puede disponerse de información acerca de, al menos, su trazado, longitud, tiempo de recorrido y dificultad, en las *fichas*

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): “Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos”, *GeoFocus*, nº 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

técnicas localizadas en la “Ventana del visitante de los Parques Naturales”, página *web* de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía (2014).

La información básica requerida para la realización de este trabajo tiene una triple vertiente: la localización espacial y trazado de los senderos, la pendiente sobre la que se desarrollan y los datos procedentes de la medición del tiempo empleado en recorrerlos.

- a) La localización y trazado de cada sendero puede encontrarse en distintas guías y publicaciones relativas al Parque Natural, si bien ha sido la información proporcionada por las citadas *fichas técnicas* la empleada en este trabajo, debido a su disponibilidad digital y nivel de detalle; esta información puede ser descargada en distintos formatos (*.kml, *.gpx, *.plt) y, una vez transformada a la proyección y *datum* requeridos (originalmente aparece en coordenadas geográficas, *datum* WGS 84), está dispuesta para su tratamiento y edición en un entorno SIG.
- b) Para calcular la pendiente de cada sendero, considerando que puede diferir en cada tramo del mismo, se ha optado por la utilización de la información altimétrica contenida en el Modelo Digital de Elevaciones de 10 m, publicado por la Junta de Andalucía (2003) y que puede descargarse en unidades coincidentes con las hojas de la cartografía 1:10.000, a partir de la página *web* del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA).
- c) Acerca del tiempo empleado en recorrer cada sendero, se dispone de dos fuentes principales de información:
 1. La proporcionada en su *web* por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía, que consta de:
 - Las fichas técnicas.
 - Los folletos y publicaciones:
 - Cuadernos de los Senderos de los Parques Naturales.
 - Mapa de Uso Público del Parque Natural Sierra de Grazalema,
 - Información práctica y Cartografía del Parque Natural.
 - La dispuesta físicamente sobre el terreno (postes y paneles informativos); según el *Manual de Señalización de Uso Público* publicado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (1998), el tiempo que muestran “*es estimado para una velocidad media de marcha de 3 km/h, teniendo en cuenta el grado de dificultad*”.
 2. La obtenida a través de *Wikilocs*, página *web* donde se pueden consultar, almacenar y descargar rutas en formato digital, capturada mediante GPS o aplicaciones integradas en *smartphones*. Esta información, disponible para la mayoría de los senderos del Parque Natural de Grazalema, orienta acerca de la longitud y trazado de rutas y del tiempo empleado en recorrerlas; aunque los datos de demora suelen diferir entre sí, posibilitan el cálculo de estadísticos.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, nº 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

De los veinte senderos de Uso Público existentes en el Parque Natural Sierra de Grazalema han sido seleccionados aquéllos de los que se disponía de información temporal más completa, en este caso, los que en la página *web Wikiloc* estaban caracterizados por un mínimo de cinco registros temporales, ocho senderos; la localización espacial de los senderos seleccionados se muestra en la figura 1, mientras que los datos de tiempo de recorrido de estos senderos se encuentran en la tabla 1 y su perfil topográfico aparece en la figura 2.

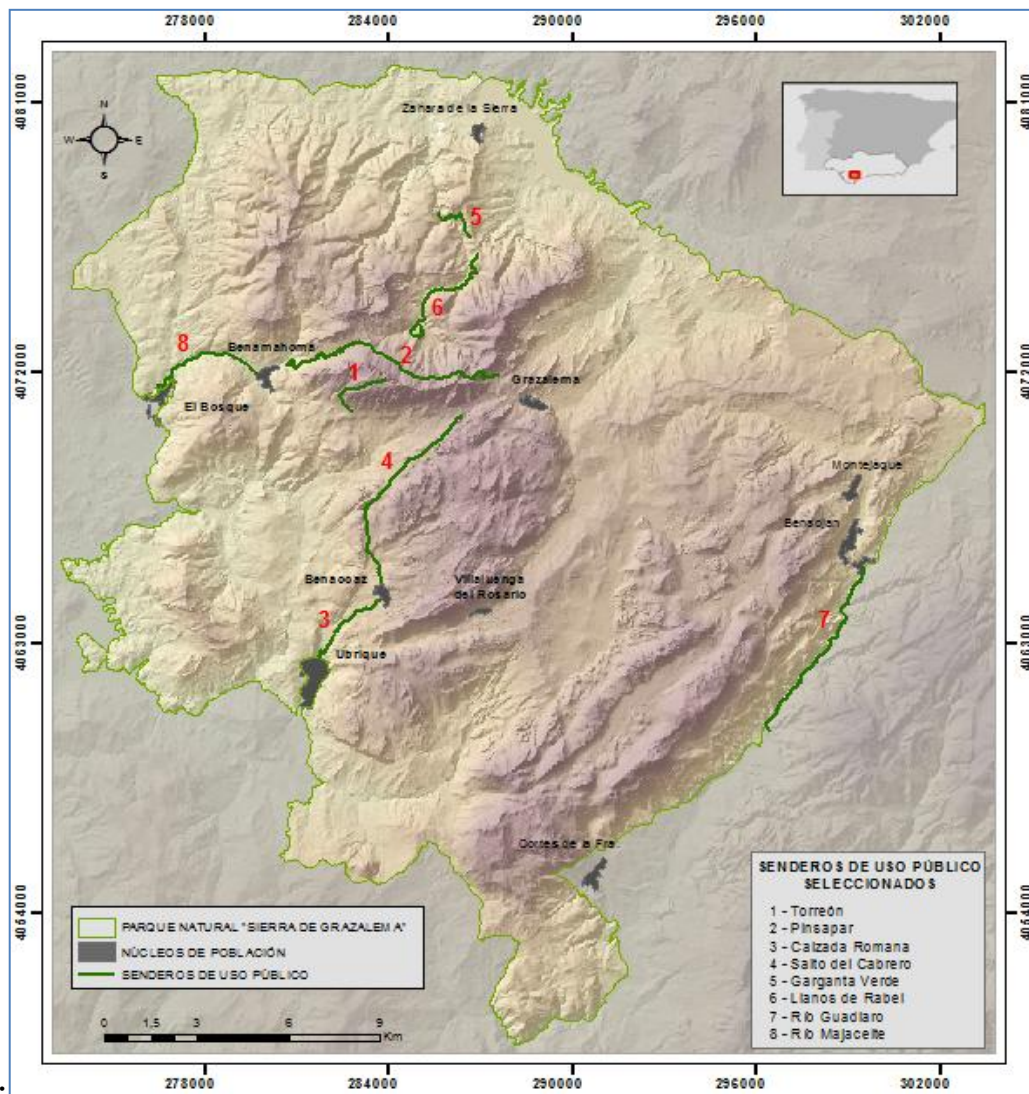


Figura 1: Localización de los Senderos de Uso Público seleccionados. Fuente: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía (2014).

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, nº 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

Tabla 1: Datos de demora, relativo a los senderos de uso público seleccionados del Parque Natural Sierra de Grazalema

Nombre	Tiempo de ida (minutos)			Estadísticos Wikiloc				
	Fichas-Cuadernos	Mapa-Cartografía	Postes-Paneles	Nº de casos	Media	Desviación	CV	Mediana
El Torreón	120	180	180	21	132	37	0,3	129
El Pinsapar	270	300	360	15	279	50	0,2	267
La Calzada Romana	120	60	60	5	73	26	0,4	71
La Garganta Verde	100	150	100	5	112	36	0,3	109
Llanos del Rabel	120	120	90	8	135	32	0,2	146
Río Guadiaro	180	180	180	5	197	34	0,2	206
Río Majaceite	120	120	120	12	115	29	0,3	126
Salto del Cabrero	240	240	180-240	9	243	61	0,3	233

Fuente: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía (2014); Wikiloc.com.



Figura 2: Perfil topográfico de los Senderos de Uso Público seleccionados. Fuente: elaboración propia.

Las características básicas de los senderos se detallan a continuación:

1. El Torreón: de unos 3.100 m de longitud y un desnivel superior a los 750 m, su pendiente media sobrepasa el 25% y está catalogado como de dificultad alta. Su orientación es, a grandes rasgos, norte-sur. El tiempo estimado está tomado partiendo del punto situado más al sur, por lo que la gran mayoría del recorrido se lleva a cabo subiendo; respecto al firme,

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

destacar que en su tramo superior la senda, como tal, desaparece y es necesario desplazarse por rocas.

2. El Pinsapar: con algo más de 11 km de longitud, el sentido aconsejado del recorrido es E-O (Grazalema-Benamahoma); en este sentido, su pendiente media es negativa (-15%), si bien se inicia con una relativamente fuerte subida. Catalogado de dificultad media, algo menos de la mitad final del trayecto es pista forestal.
3. La Calzada Romana: de dificultad baja, en gran parte de su trazado no posee el firme típico de los senderos al estar empedrado. Su longitud es de unos 3.350 m, el desnivel supera los 400 m y su pendiente media es negativa (-13%), desarrollándose en un descenso casi continuo en el sentido N-S (Benaocaz-Ubrique).
4. El Salto del Cabrero: de dificultad media, casi 8 km de longitud separan el punto de inicio (Puerto del Boyar) de su final (Benaocaz). Su pendiente media es baja, si bien el tramo final es un fuerte descenso. Respecto al firme, en algunas zonas suele estar embarrado gran parte del año, lo que retarda puntualmente la velocidad.
5. Garganta Verde: con un desnivel de más de 250 m y una longitud superior a los 2,5 km, está catalogado como de dificultad alta. El sendero desciende un abrupto cañón (en ocasiones, mediante escalones y barandillas) hasta llegar al arroyo de Bocaleones, donde la pendiente se suaviza, finalizando en la llamada "Ermita de la Garganta Verde".
6. Llanos de Rabel: sendero de dificultad baja y longitud superior a los 6 km, posee una escasa pendiente positiva que atraviesa por buen firme una serie de suaves lomas en dirección N-S, hasta alcanzar la base del Pinsapar de Grazalema.
7. Río Guadiaro: sendero sinuoso de baja dificultad que discurre paralelo al río Guadiaro, por lo que sus más de 7 km de longitud tienen una escasa pendiente ascendente (sentido SO-NO, Estación de Jimera de Libar-Estación de Benaoján); a medida que avanza, la senda mejora su firme, dando paso a un carril.
8. Río Majaceite: la senda une las poblaciones de Benamahoma y El Bosque, descendiendo por la ribera del río Majaceite mediante una leve pendiente (8%, de media). Su longitud es de algo más de 4 km y el firme es de tierra o piedras. Su dificultad es baja.

3. Estado de la cuestión

La revisión bibliográfica acerca de los métodos destinados a calcular el tiempo empleado en realizar un recorrido pedestre permite conocer algunos elaborados con vistas a una aplicación práctica, así como otros que, por su complejidad, requieren la utilización de medios informáticos. La consideración del signo de la pendiente, además, diferencia claramente dos grupos de métodos, isotrópicos y anisotrópicos: los isotrópicos tratan con superficies donde el coste de atravesarlas es independiente del sentido del movimiento (se calcula igual valor temporal tanto en la subida como

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

en la bajada de una misma pendiente), mientras que para los anisotrópicos el sentido del movimiento influye en su coste (el tiempo empleado en ascender por una ruta suele ser diferente al de bajarla). Por otra parte, una serie de datos, procedentes básicamente del campo de la fisiología, debe ser tenida en cuenta en este contexto: la velocidad óptima de desplazamiento para un ser humano, la velocidad máxima que puede llegar a desarrollar y el grado de pendiente en que se alcanza ese valor. A continuación se describen algunas de las principales aportaciones sobre el tema, distinguiendo las aplicaciones isotrópicas de las anisotrópicas y estableciendo comparaciones entre ellas.

Entre las aplicaciones isotrópicas destacan las conocidas como *reglas*, que permiten que, a partir del trazado del recorrido en una cartografía en papel, pueda obtenerse rápidamente un resultado temporal aproximado, considerando tanto la longitud recorrida como la diferencia vertical existente y una velocidad máxima estipulada. Una de las *reglas* más conocidas es la de Naismith (1982), procedimiento que habría que considerar junto a las modificaciones de Aitken (1977) y las aportaciones de Scarf (2007). Rees (2003b) se encuentra entre los escasos autores que, aun empleando una formulación isotrópica, emplea una función cuya implementación requiere de medios informáticos.

Naismith, montañero escocés de finales del siglo XIX, calculó que un caminante, en buena forma y en expediciones fáciles, empleaba 1 hora en recorrer 3 millas (4,82 km), a lo que se añadiría 1 hora más por cada 2.000 pies (609,6 m) de ascensión (Naismith, 1892). La denominada *Regla de Naismith*, utilizada durante largo tiempo para estimar la duración de un recorrido en zonas agrestes, supone emplear, aproximadamente, 1 hora en recorrer 5 km, a lo que se sumaría 1 hora más por cada 600 metros de ascenso (figura 3). Sin embargo, la *Regla de Naismith*, a pesar de dar un razonable tiempo mínimo (Aitken, 1997; Langmuir, 1984), no parece ajustarse a los resultados obtenidos por un caminante medio; según Kennedy (1988), solo es aplicable a montañeros razonablemente en forma, en un terreno estándar y con buenas condiciones meteorológicas, sin considerar que en un descenso pronunciado la velocidad disminuye debido a la necesidad de dar pasos más cortos, o bien al hecho de reducir la pendiente mediante un aumento de la longitud empleando la técnica del zig-zag.

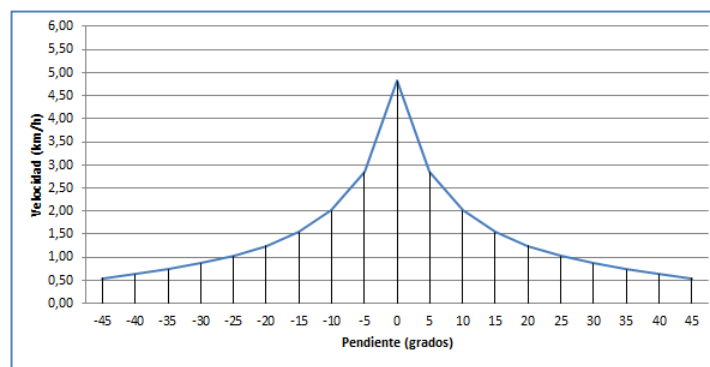


Figura 3: Relación entre velocidad y pendiente (Naismith). Fuente: elaboración propia.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): “Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos”, *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

La fórmula de Naismith ha sufrido una serie de modificaciones que, básicamente, buscan el incremento del tiempo final resultante: Tranter (citado por Kennedy, 1998:4) tiene en cuenta los efectos de la fatiga y considera que la velocidad media disminuye en función de una menor preparación física y mayor duración del esfuerzo; Aitken (1977) mantiene que 5 km/h es una velocidad adecuada para senderos, pistas y carreteras, pero la disminuiría a 4 km/h si se empleasen otras superficies; Langmuir (1984) considera que habría que sustraer 10 minutos por cada 300 m de descenso en pendientes que oscilan entre -5 y -12° y añadir 10 minutos si se superan los -12°. Drakos (1998), finalmente, propone tomar el valor de Naismith y añadir un 50% de tiempo extra. Scarf (2007) se centra en la relación entre distancia y pendiente, lo que le permite evitar considerar el peso y el estado de forma del individuo, y plantea la *Regla de Naismith* en términos de relación entre distancia planimétrica y diferencia altimétrica recorridas en igual tiempo. El denominado *Número de Naismith* (α) tendría, en función de los datos contenidos en su *regla*, un valor de 1:7,92, pues en el mismo tiempo que es posible salvar una diferencia altimétrica de 1 metro se recorrerían 7,92 metros de longitud. Tras analizar los tiempos y distancias realizados por distintos corredores, Scarf llega a la conclusión de que α oscila entre 1:8 (para hombres) y 1:10 (para mujeres). Bennet (1985) indica que el *Scottish Mountaineering Club* emplea un valor de α igual a 1:7,5, mientras que los guías de orientación, por simplicidad, utilizan un valor de α igual a 1:10 (Disley, 1972). Por otra parte, Scarf introduce el concepto de *distancia equivalente*, que resulta de sumar a la distancia horizontal recorrida la distancia horizontal a la que equivale la diferencia vertical (calculada a partir de α). Si el valor de longitud obtenido se multiplica por el tiempo que tarda en recorrerse (en terreno llano y liso) una unidad de su longitud (“pace”), el resultado es el tiempo necesario para recorrer un itinerario.

Rees (2003a), tras investigar el tiempo destinado a realizar rutas en áreas de montaña, sugiere que “*la componente horizontal de la velocidad mantenida sobre una superficie de pendiente determinada, es adecuadamente descrita por la función cuadrática*”:

$$\frac{1}{v} = a + b * m + c * m^2 \quad (1)$$

siendo v la velocidad (m/sg), m la relación entre diferencia altimétrica y distancia planimétrica recorrida (dh/dx), y a , b y c coeficientes (con valores de $0,75 \text{ sm}^{-1}$, $0,09 \text{ sm}^{-1}$, y $14,6 \text{ sm}^{-1}$, respectivamente), si bien en un trabajo posterior (Rees, 2003b) indica que el valor de b no es crítico y que podría ser sustituido por 0 (figura 4).

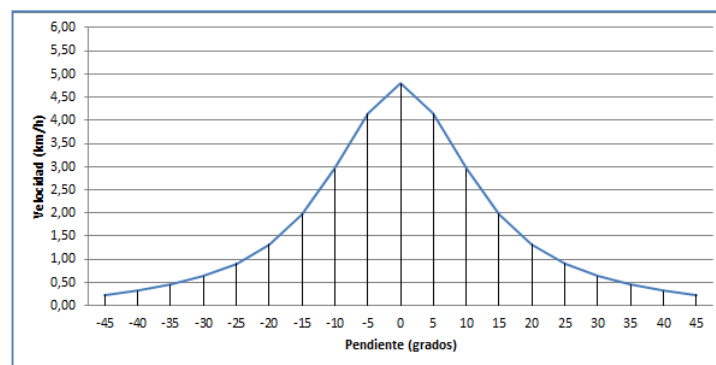


Figura 4: Relación entre velocidad y pendiente (Rees). Fuente: elaboración propia.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

Entre los métodos anisotrópicos también podría considerarse la existencia tanto de reglas como de funciones matemáticas de mayor complejidad; entre las primeras sobresale el MIDE, propuesto por la Federación Española de Montaña y Escalada (FEDME); entre las segundas se encontrarían las planteadas por Langmuir, Ericson y Goldstein, y Tobler.

La FEDME recomienda el MIDE (Método de Información De Excursiones), método concebido por París Roche (2002) para prevenir accidentes en el medio natural mediante la valoración previa de la excursión. En el apartado dedicado a la cantidad de esfuerzo necesario para realizar un recorrido, permite calcular las horas de marcha efectiva para un excursionista medio, poco cargado, en virtud de una combinación entre el tiempo empleado en recorrer la distancia horizontal (5 km/h para carreteras y pistas; 4 km/h para caminos de herradura, sendas lisas y prados; y 3 km/h para malas sendas, canchales y cauces de río) y el necesario para superar el desnivel (1 hora por cada 400 m de subida o por cada 600 m de bajada). El método permite dividir la ruta en tramos, en función del tipo de piso, y el cálculo se lleva a cabo seleccionando el mayor de los dos valores temporales (relativos a la distancia horizontal y a la vertical) y sumándole la mitad del menor (figura 5); el resultado final, suma del tiempo necesario para recorrer cada uno de los tramos que componen la ruta, debe ser redondeado "usando el sentido común, y teniendo en cuenta detalles como cruces de ríos, tramos difíciles que requieren tiempo y esfuerzo pero no se avanza, pendientes muy favorables, sendas estrechas pero rectas y lisas, etc." Debe considerarse que su aplicabilidad es solo válida si el tiempo a emplear no supera las 15 horas. Por otra parte, el método fue comprobado por un grupo de expertos a partir de su conocimiento de 58 excursiones de distinta dificultad, duración y tipo de terreno en el Pirineo aragonés (FAM- Federación Aragonesa de Montañismo, 2003).

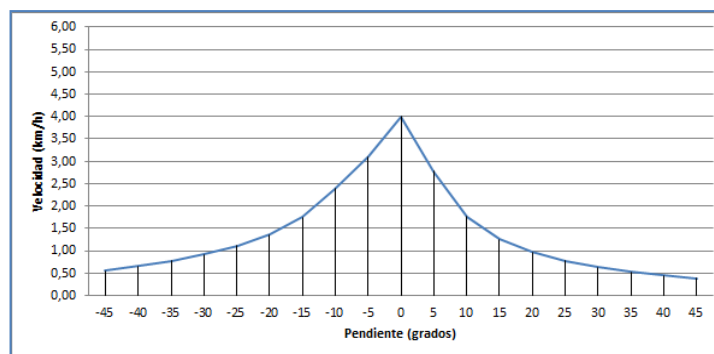


Figura 5: Relación entre velocidad y pendiente para senderos (MIDE). Fuente: elaboración propia.

Ericson y Goldstein (1980), en estudios sobre el gasto energético relativo al desplazamiento para poblaciones prehistóricas, formulan una función que distingue entre la subida y bajada de pendientes:

$$T = \Delta D + 3.168 * \Delta H_{up} + 1.2 * |\Delta H_{down}| \quad (2)$$

donde T es el tiempo medido en segundos, ΔD es la distancia planimétrica, ΔH_{up} es la diferencia altimétrica positiva y ΔH_{down} hace referencia a la diferencia altimétrica negativa. La máxima velocidad es alcanzada con una pendiente nula (figura 6).

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

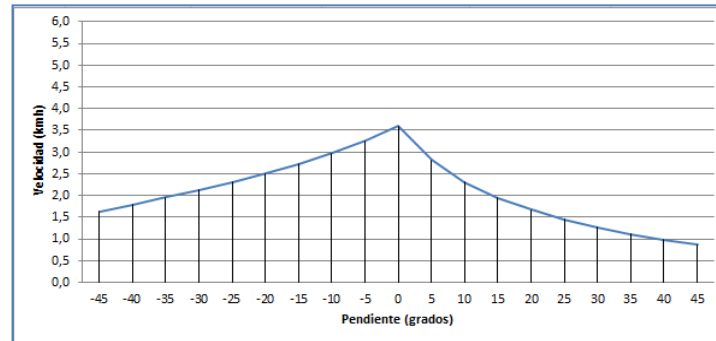


Figura 6: Relación entre velocidad y pendiente (Ericson y Goldstein). Fuente: elaboración propia.

Langmuir (1984) estima adecuada una velocidad de 5 km/h, a la que le sumaría 1 hora más por cada 600 metros de ascenso, restando 10 minutos por cada 300 m de descenso (para pendientes entre -5° y -12° o, en porcentajes, -8.74 y -21.75%) y sumando 10 minutos por cada 300 m de descenso, para pendientes negativas superiores a -12° . La *regla de Langmuir* se emplea para el cálculo del coste mínimo acumulado (función *r.walk*) en el programa GRASS 5², basado en el algoritmo en principio desarrollado por Fontanari (2001), cuya función da idénticos resultados a los de la formulación original:

$$T = (A * S + B * Hu + C * Hmd + D * Hsd) \quad (3)$$

donde T es el tiempo medido en segundos, S es distancia, y H es la diferencia altimétrica, medidas ambas en metros (Hu : pendiente positiva; Hmd : pendiente negativa moderada; Hsd : pendiente negativa abrupta). Las constantes A , B , C y D y sus valores de referencia suponen: A ($1/\text{velocidad} = 0,72$), B (coste asociado a pendiente positiva = 6), C (coste asociado a pendiente negativa leve (entre $S \geq -5^\circ$ y $S < -12^\circ$) = 1,9998), y D (coste asociado a pendiente negativa abrupta ($\geq -12^\circ$) = -1,9998). Los valores que se encuentran entre 0 y -5° no tienen ningún coste asociado, lo que hace suponer que en este rango la función estima únicamente velocidad y longitud.

Herzog (2010) considera que la función de Langmuir adolece de continuidad, especialmente a partir de los -12° , donde el tiempo se incrementa enormemente a pesar de que los cambios de pendiente pueden ser muy leves, y observa que puede lograrse una función continua si se igualan los ponderadores de las pendientes moderadas y abruptas negativas, o bien se elimina el coste de las pendientes negativas leves (figura 7).

Tobler (1991), a partir de información gráfica proporcionada por Imhof (1952), propone una función que estima la velocidad en función de la pendiente y su sentido de forma exponencial:

$$W = 6 * \text{Exp}(-3.5 * \text{Abs}(S + 0.05)) \quad (4)$$

donde W representa la velocidad en km/h, mientras que S indica el valor de pendiente (dh/dx). El autor precisa que, en terrenos llanos, la velocidad máxima obtenida sería de 5 km/h y, en el caso de que la ruta no discorra por senderos, la velocidad disminuiría en $3/5$ (figura 8).

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

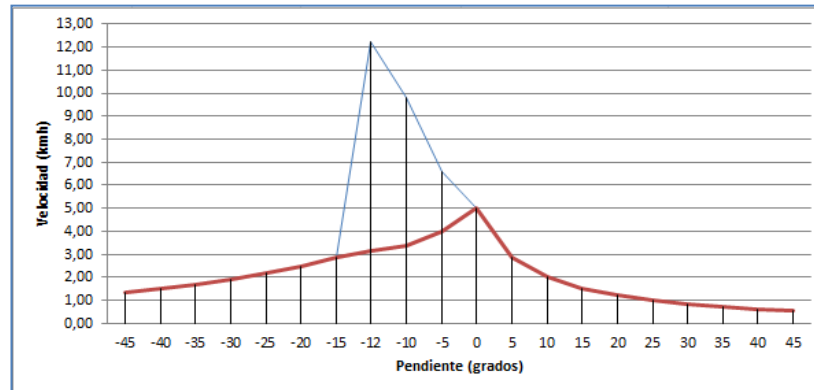


Figura 7: Relación entre velocidad y pendiente (Langmuir). Fuente: elaboración propia.

La *hiking function* de Tobler ha sido muy utilizada, tanto por la continuidad de sus valores como por la sencillez de su inclusión, en algoritmos informáticos propios de los SIG (White y Barber, 2012); es significativo que haya sido integrada en la fórmula de Santee *et al.* (2001), en su versión actualizada de la ecuación de Pandolf *et al.* (1977), ecuación usualmente empleada para el cálculo de rutas óptimas en investigaciones de arqueólogos y antropólogos (Weathley y Gillings, 2002; White, 2012). Sin embargo, la función también ha tenido diversas críticas, derivadas de la utilización del tiempo en lugar del gasto energético, su excesiva simetría, la no consideración de los obstáculos (Jobe y White, 2009), mostrarse relativamente rápida en altas pendientes negativas (Pingel, 2010) o por el hecho de que los valores procedentes de su función den lugar a un gráfico que no se ajusta del todo al originalmente creado por Imhof (Herzog, 2010).

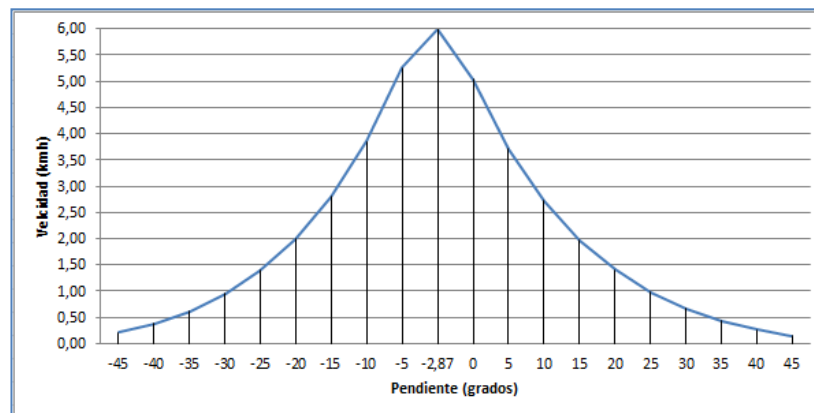


Figura 8: Relación entre velocidad y pendiente (Tobler). Fuente: elaboración propia.

Junto a las reglas y funciones anteriores, la revisión bibliográfica permite conocer una serie de datos procedentes de mediciones sistemáticas realizadas sobre la locomoción pedestre del ser humano: velocidad óptima, velocidad máxima desarrollable y el ángulo de pendiente en que se alcanza esa máxima velocidad:

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

- a) La velocidad que, en terreno llano y liso, supone un menor esfuerzo, se estima en 1,11 m/sg, o 3,96 km/h (Minetti *et al.*, 2002); es también la velocidad estándar (*crosswalk walking speed estándar*) recomendada por el Departamento de Transportes de EE.UU. (Wood y Schmidlein, 2012).
- b) La velocidad máxima, aquélla a la que el coste energético de andar comienza a superar al de correr, es estimada por Margaría (1938, 1976) en 2,36 m/sg (8,5 km/h), mientras que Minetti *et al.* (2002) rebajan ese valor, para pendientes que se encuentren entre $\pm 15^\circ$, a 2,2 m/sg (7,92 km/h).
- c) Respecto al ángulo de la pendiente al que se alcanza la máxima velocidad, la mayoría de autores están de acuerdo con Minetti *et al.* (2002), que concluye que se localizaría en torno a los -10% ($-5,7^\circ$).

Comparados los resultados de las diferentes funciones entre sí (figura 9) y puestos en relación con los datos aportados por mediciones sistemáticas, puede comprobarse que:

- Todas las funciones, excepto la de Tobler (1991), coinciden en una disminución de la velocidad a medida que aumenta la pendiente positiva; en la *hiking function* de Tobler, la máxima velocidad se alcanza a los $-2,87^\circ$, lo que concuerda más que las restantes con los datos aportados por Minetti *et al.* (2002).
- Las velocidades máximas oscilan entre los 6 km/h (Tobler, 1991) y 3,6 (Ericson y Goldstein, 1980), inferiores en cualquier caso a las medidas tomadas por Minetti *et al.* (2002) para la máxima velocidad.
- Con una pendiente de 0° , las velocidades alcanzadas se encuentran entre 3,6 y 5,04 km/h (Ericson y Goldstein 1980 y Tobler, 1991, respectivamente), si bien es la función integrada en el MIDE (Paris Roche, 2002) la que se muestra más próxima a los valores de referencia medidos por Minetti *et al.* (2002).
- Algunas funciones presentan discontinuidades como consecuencia de modificar el cálculo a partir de determinados valores de pendiente (por ejemplo, en la función de Langmuir, 1984) o debido a los resultados de la comparación entre tiempos empleados en el desplazamiento vertical respecto al horizontal (MIDE).
- Ante pendientes de igual magnitud, la velocidad de bajada es igual o superior a la de subida; son las funciones de Ericson y Goldstein (1980) y Langmuir (1984) las que más destacan este hecho, (velocidad mínima de bajada superior a 1 km/h), mientras que en las funciones isotrópicas (Naismith, 1892; Rees, 2003a) la velocidad es, lógicamente, idéntica.
- A medida que aumenta la pendiente positiva más similares son los resultados obtenidos por las funciones de Naismith (1892) y Langmuir (1984) y, de ahí, que aparezcan confundidas en el sector de las pendientes positivas (figura 9).

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

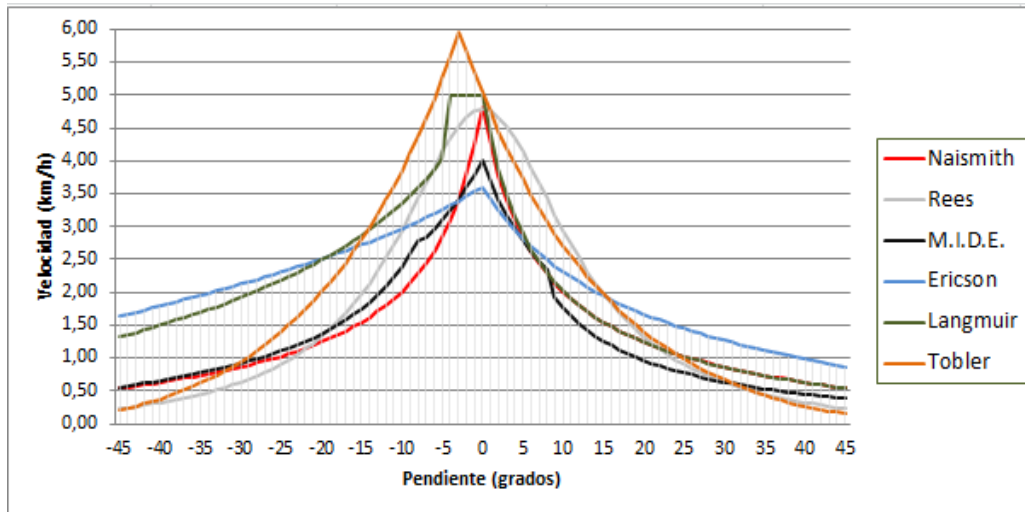


Figura 9: Representación de las funciones que relacionan velocidad y pendiente. Fuente: elaboración propia.

4. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es comparar distintos métodos destinados a calcular el tiempo de demora en la realización de recorridos pedestres, con la idea de conocer aquél que se muestre más eficaz; el resultado se circunscribe a un tipo determinado de senderos (de uso público) y a la consideración de dos únicas variables (longitud y pendiente). Objetivos específicos son:

- a) Caracterizar con precisión la longitud, altimetría y pendiente de los senderos.
- b) Calcular el tiempo de realización de cada sendero por cada método.
- c) Elegir el método más eficaz, a partir de la comparación de los valores temporales calculados con los medidos; para ello es necesario:
 - Comparar los estadísticos globales de tiempo estimado y tiempo medido.
 - Comparar las diferencias netas y porcentuales que, por cada método y sendero, existen entre tiempos calculados y medidos.
 - Analizar la relación entre diferencias porcentuales por método y tipo de pendiente.
 - Comparar los resultados globales de los métodos de cálculo.

5. Metodología

Para la realización de los objetivos expuestos en el apartado anterior es empleado el *software ArcGis 10* (ESRI, 2010)³. En síntesis, las operaciones de cálculo del tiempo han sido realizadas exclusivamente a partir de la tabla de atributos asociada a la capa lineal correspondiente a los senderos.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, nº 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

El plan de trabajo requiere:

- i. Caracterizar los senderos por su longitud, altimetría y pendiente: captura de los datos digitales relativos a los senderos a partir de una fuente de información fiable y posterior ajuste a fuentes de información precisas; ordenación adecuada del sentido de los arcos, subdivisión en tramos y caracterización de cada tramo por su altura (inicial y final) y pendiente.
- ii. Calcular el valor de tiempo para cada sendero: aplicación de los métodos propuestos por Naismith (1892), Rees (2003a), MIDE (Paris Roche, 2002), Langmuir (1984, según la corrección de Herzog, 2010), Ericson y Goldstein (1980) y Tobler (1991).
- iii. Comparar los valores de tiempo calculados con los datos procedentes de las mediciones.

5.1. Caracterización de los senderos por longitud, altimetría y pendiente

1- Captura de la información: obtenida la información digital relativa a cada uno de los ocho senderos seleccionados del Parque Natural de la Sierra de Grazalema, a partir de los datos aportados por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía (2013), y exportada a formato *shapefile*, es transformado su sistema de referencia de coordenadas (SRC, originalmente GWS_84) al SRC ED_50_UTM_Huso_30N.

2- Edición y corrección topológica: la información lineal correspondiente a todos los senderos es integrada en una sola capa, asegurando su conectividad y eliminando arcos duplicados, sobrantes (*dangle*) y los pseudonodos. Posteriormente, dado que las *polilíneas* que conforman cada sendero no se ajustan totalmente a los indicios que de ellas pueden observarse en las ortofotografías aéreas de la zona, han sido de nuevo digitalizadas (a escala 1:1.500), ajustándolas a las imágenes más recientes (2010-2011) y precisas (0,5 m), obtenidas a partir del Instituto de Estadística y Cartografía-IECA de la Junta de Andalucía.

3- División de cada elemento en segmentos uniformes: debido a que un mismo arco puede atravesar pendientes muy distintas, es conveniente fraccionar cada *polilínea* en segmentos de pendiente homogénea, o bien de una longitud tal que permita caracterizarlos con un margen de error escaso; aquí se ha optado por esta segunda posibilidad, ya que las pendientes a extraer de un Modelo Digital de Elevaciones-MDE pueden ser muy diferentes en función del algoritmo empleado para calcularlas y el proceso de intersección de las isóclinas con los arcos procedentes de los senderos es excesivamente costoso en tiempo. De este modo, empleando la densificación de los vértices, por cada sendero han sido creados múltiples arcos de 10 m de longitud (Pingel, 2010 emplea una media de 13 m). Este proceder, además, tiene la ventaja de proporcionar elementos de longitud similar (útil si se desea trabajar con ellos como unidades).

4- Cálculo de la longitud y pendiente de cada segmento: la longitud sobre el plano es obtenida de forma directa a partir de la geometría de los arcos, mientras que el cálculo de la

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

pendiente requiere relacionar los valores altimétricos de cada inicio y final de arco con la distancia planimétrica que los separa. En este punto hay que considerar que las pendientes pueden ser positivas o negativas y que ello depende tanto de los valores altimétricos de sus extremos como del sentido del movimiento: si cada sendero tiene un punto inicial y otro final conocidos y todos los arcos apuntan hacia el punto final, al restar la altura inicial de la final es calculada una pendiente positiva si el valor de altura final es superior, mientras que se obtendrá una pendiente negativa si es inferior. Así, una vez ordenados adecuadamente los arcos y caracterizados altimétricamente sus extremos (mediante interpolación bilineal, a partir de las celdillas del MDE coincidentes), es posible calcular su diferencia altimétrica y, al relacionarla con su distancia planimétrica, obtener la pendiente porcentual de cada uno.

5.2. Caracterización de los senderos por valores de tiempo.

A partir de la descripción de los métodos de cálculo efectuada en el capítulo 3, son definidas las funciones que dan lugar a valores de tiempo, considerando tanto velocidad inicial como longitud y pendiente. A partir de ellas es estimado el tiempo que tardaría en recorrerse cada sendero en el sentido de ida. El cálculo del tiempo se lleva a cabo a partir de la tabla de atributos del *shapefile* correspondiente a los senderos, tabla donde cada tramo (10 m) es caracterizado por valores de pendiente (en tantos por uno o porcentaje) o diferencia altimétrica y longitud (L , en metros); el tiempo total (T , en segundos) resulta de la suma de los tiempos parciales obtenidos en cada tramo del mismo sendero.

- A) Naismith (1892): empleando un valor de α igual a 7,92 (relación entre la distancia recorrida y diferencia altimétrica superada en igual tiempo), es generada una función donde el tiempo es calculado a partir de la longitud (L) y la pendiente ($|\Delta h/\Delta d|$) en tantos por uno:

$$T = ((3600 * L)/4820) + (((3600 * |\Delta h/\Delta d|)/609,6) \quad (5)$$

- B) Rees (2003a): la función puede ser reformulada para obtener el tiempo en segundos, pues, si $1/V = a + b * (\Delta h/\Delta d) + c * (\Delta h/\Delta d)^2$ (siendo $a = 0,75$; $b = 0,09$; $c = 14,6$) y $T = L / V$:

$$T = L * (0,75 + 0,09 * |\Delta h/\Delta d| + 14,6 * (\Delta h/\Delta d)^2) \quad (6)$$

- C) MIDE (Paris Roche, 2002): la función requiere estimar tanto el tiempo relativo al desplazamiento horizontal como al vertical y sumar al mayor de los valores la mitad del menor. En la siguiente expresión, T_x es el tiempo (sg) empleado en el desplazamiento horizontal, T_{ys} es el tiempo utilizado en el desplazamiento vertical positivo (subida) y T_{yb} lo es en el desplazamiento vertical negativo (bajada); la diferencia altimétrica entre los extremos de cada sector es Δh (diferencia altimétrica, en metros):

$$T_{\text{subida}} = T_x \geq T_{ys} \quad T = ((3600 * L)/4000) + (((3600 * \Delta h)/400)/2) \quad (7)$$

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

$$T_{\text{bajada}} = \begin{cases} T_x < T_{ys} & T = (((3600 * L)/4000)/2) + ((3600 * \Delta h)/400) & (8) \\ T_x \geq T_{yb} & T = ((3600 * L)/4000) + (((3600 * \Delta h)/600)/2) & (9) \\ T_x < T_{yb} & T = (((3600 * L)/4000)/2) + ((3600 * \Delta h)/600) & (10) \end{cases}$$

D) Langmuir (1984): al clasificar las pendientes en cuatro categorías (positiva, nula, negativa moderada y abrupta) y ponderar cada una por un factor diferente, origina una función discontinua donde los valores de velocidad máxima son superiores a 12 km/h y el ángulo de la pendiente en que se alcanza la máxima velocidad se sitúa en -12° (para Minetti *et al.*, 2002 este valor debería situarse en torno a los $-5,7^\circ$). Por estas razones, las modificaciones a su función sugeridas por Herzog (2010) han sido aquí aplicadas, igualando los ponderadores de las pendientes leves y abruptas negativas (1,9998), consiguiendo así una mayor continuidad, al tiempo que se rebaja la máxima velocidad y se sitúa el punto de inflexión en 0° (Δh es la diferencia altimétrica, en metros).

$$\text{Pendiente} > 0 \quad T = L * 0.72 + \Delta h * 6 \quad (11)$$

$$\text{Pendiente } 0 \text{ - } -5^\circ \quad T = L * 0.72 \quad (12)$$

$$\text{Pendiente} < -5 \quad T = L * 0.72 + \Delta h * 1.9998 \quad (13)$$

E) Ericson y Goldstein (1980): propone la utilización de dos tipos de pendientes, positivas y negativas, que son ponderadas por un factor diferente; al resultado le es sumado la longitud; Δh_s es la diferencia altimétrica positiva y Δh_b es la negativa:

$$T_{\text{subida}} = L + 3.168 * \Delta h_s \quad (14)$$

$$T_{\text{bajada}} = L + 1.2 * |(\Delta h_b)| \quad (15)$$

F) Tobler (1991): la función (4), donde W representa la velocidad en km/h, es reformulada para permitir calcular valores de tiempo en segundos a partir de valores de longitud (L , en metros) y pendiente (dh/dx):

$$T = (L / (6 * e^{-3.5 |dh/dx|} + 0.05)) * 3.6 \quad (16)$$

5.3. Comparación de los valores temporales calculados con los medidos

La comparación entre datos estimados y medidos se lleva a cabo en cada sendero y por cada uno de los métodos de cálculo. Como resultado, son generados valores netos (a partir de la resta de tiempos) y porcentuales (considerando la división del tiempo medido entre el calculado y multiplicando el resultado por 100). El primer procedimiento posibilita estimar el error de cada método de cálculo, mientras que el segundo permite comparar unos métodos con otros.

6. Resultados

Los resultados obtenidos se centran en: a) caracterización de los senderos por valores de longitud, altura y pendiente; b) caracterización de los senderos por valores de tiempo calculado y

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

comparación de los estadísticos globales; c) comparación de las diferencias netas y porcentuales que, por cada método y sendero, existen entre tiempos calculados y medidos, y d) comparación de los resultados globales de los métodos de cálculo.

a) Caracterización de los senderos por longitud, altimetría y pendiente.

A partir de la información digital (*polilíneas*), puesta a disposición del usuario por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, y habiéndola editado para hacerla coincidir con los senderos visibles en las ortofotos que la contuviese, de cada sendero ha sido calculada su longitud en el plano (2D), longitud real (3D), altimetría y pendiente, empleando para ello el MDE de 10 metros del IECA de la Junta de Andalucía (tabla 2).

	Longitud 2D	Longitud 3D	Altura Mínima	Altura máxima	Altura Media	Pendiente Máxima (%)	Pendiente Media (%)
Torreón	2984	3116	866	1641	1239	80	27
Pinsapar	11032	11214	471	1306	1000	67	15
Calzada Romana	3335	3366	348	764	546	39	13
Salto del Cabrero	7851	7906	732	1106	901	50	9
Garganta Verde	2486	2625	483	744	649	141	27
Llanos de Rabel	6161	6225	704	887	757	65	10
Río Guadiaro	7373	7438	396	464	432	60	11
Río Majaceite	4346	4370	261	405	326	79	8

Tabla 2: Caracterización de longitud, altura y pendiente de los senderos. Fuente: elaboración propia.

b) Caracterización de los senderos por valores de tiempo calculado.

La tabla 3 muestra el tiempo calculado por cada método (6) en cada sendero (8), junto a los tiempos medidos por las diferentes fuentes (4): el promedio de los tiempos medidos es superior al de los tiempos calculados (163 frente a 122 minutos), si bien las diferencias dentro de cada grupo respecto a su media son similares (17 minutos). Estos dos datos indican que el tiempo calculado es, con carácter general, inferior al tiempo medido, independientemente del método elegido para el cálculo o del valor temporal de referencia utilizado.

	Tiempos Calculados (min.)							Tiempos medidos (min.)						
	Naismith	Rees	M.I.D.E.	Langmuir	Ericson	Tobler	Media	Desv. Std	Fichas -Cuadernos	Mapa-Cartog.	Postes-Paneles	Mediana (Wikiloc)	Media	Desv. Std
Torreón	116	105	143	114	92	104	112	12	120	180	180	129	152	28
Pinsapar	298	232	293	218	234	196	245	34	270	300	360	267	299	31
Calzada Romana	83	58	73	52	64	45	62	11	120	60	60	64	76	22
Salto del Cabrero	171	126	167	128	152	110	142	21	240	240	210	233	231	10
Garganta Verde	90	108	93	62	60	108	87	17	100	150	100	109	115	18
Llanos de Rabel	111	88	113	87	101	127	104	12	120	120	90	146	119	15
Río Guadiaro	167	126	172	137	151	116	145	19	180	180	180	206	187	10
Río Majaceite	86	67	92	78	87	66	79	9	120	120	120	126	122	2
Promedio							122	17				163	17	

Tabla 3: Caracterización de los senderos mediante tiempos calculados y medidos. Fuente: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía (2014); Wikiloc.com y elaboración propia.

c) Comparación de las diferencias porcentuales entre tiempos calculados y medidos.

Las diferencias porcentuales entre tiempos calculados y medidos se reflejan en la figura 10: puede observarse que no en todas las ocasiones los tiempos calculados son inferiores a los medidos, que es en los tiempos relacionados con las señales (postes y paneles informativos) donde mejor se

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

aprecia este dato y que son el MIDE y el método de Naismith aquellos donde más coincide esta circunstancia. Por otra parte, también son el MIDE y el método de Naismith los que obtienen un mayor número de veces una diferencia inferior al 10% respecto a los valores medidos, coincidentes mayoritariamente con el Pinsapar, río Guadiaro y Llanos de Rabel. Si se considera, por último, que los senderos donde los tiempos medidos por los diferentes medios (fichas, cartografía, señales y Wikiloc) son más parecidos (Majaceite, Salto del Cabrero, río Guadiaro) también son aquellos cuya medida del tiempo es más fiable, los métodos que obtienen mejor resultado serían el MIDE y, a cierta distancia, el método de Naismith.

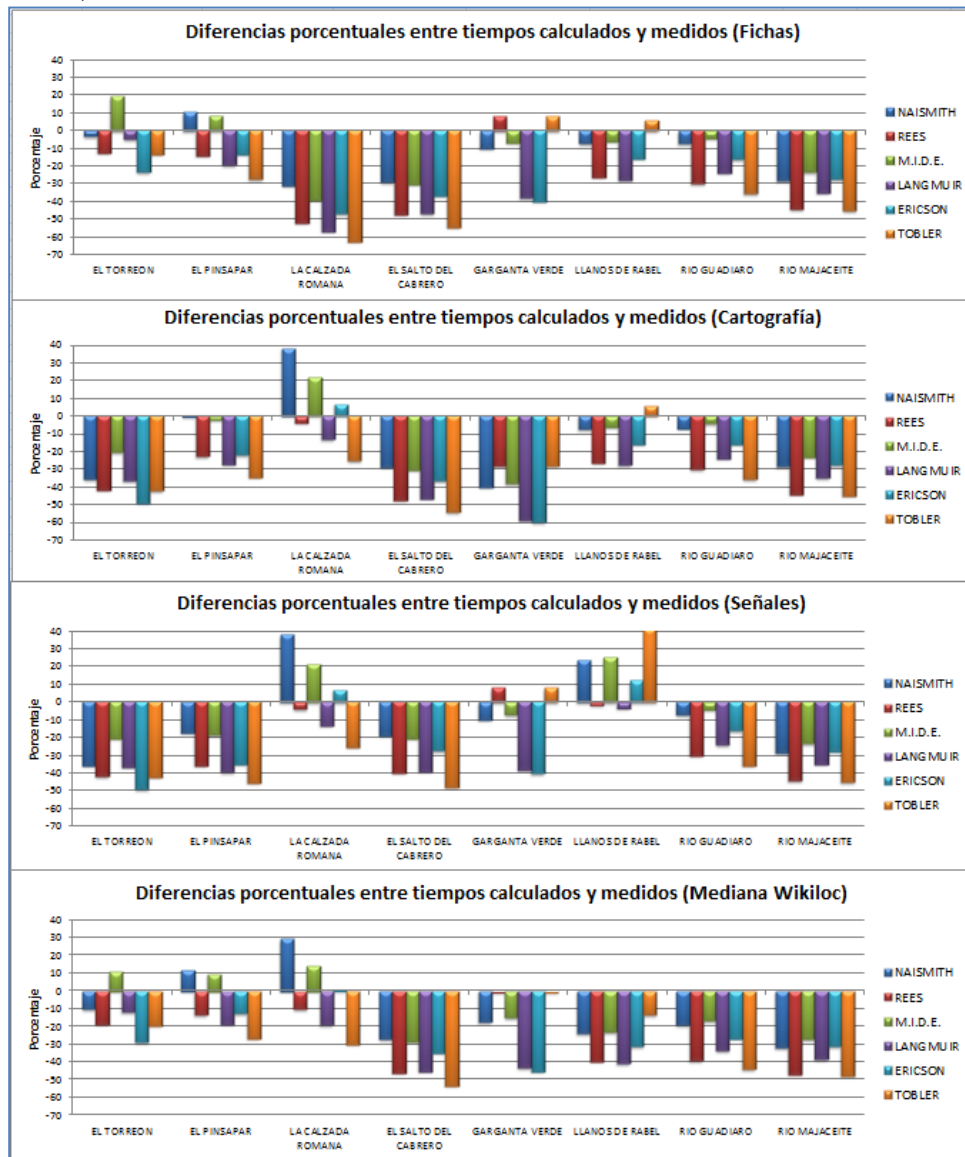


Figura 10: Diferencias porcentuales entre tiempos medidos y calculados. Fuente: elaboración propia.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

d) Análisis de la relación entre diferencias porcentuales por método y pendiente.

Respecto a una posible relación entre diferencia porcentual y pendiente, en la figura 10 puede observarse que el método de Naismith y el MIDE obtienen los mejores resultados, tanto en el sendero con mayor pendiente positiva (Torreón) como en el de menor pendiente (río Majaceite), y que los métodos de Rees y Tobler alcanzan las mínimas diferencias en los de mayor pendiente negativa (la Garganta Verde); sin embargo, si se analizan los datos de forma más precisa (figura 11), puede comprobarse que la relación entre estas variables es escasa: con la pendiente positiva guardan una correlación positiva (a más pendiente, mayor error) los métodos de Naismith y Ericson y Goldstein, mientras que el de Langmuir se correlaciona negativamente; con la pendiente negativa, solo dos métodos poseen correlación, en este caso negativa: Tobler y Rees.

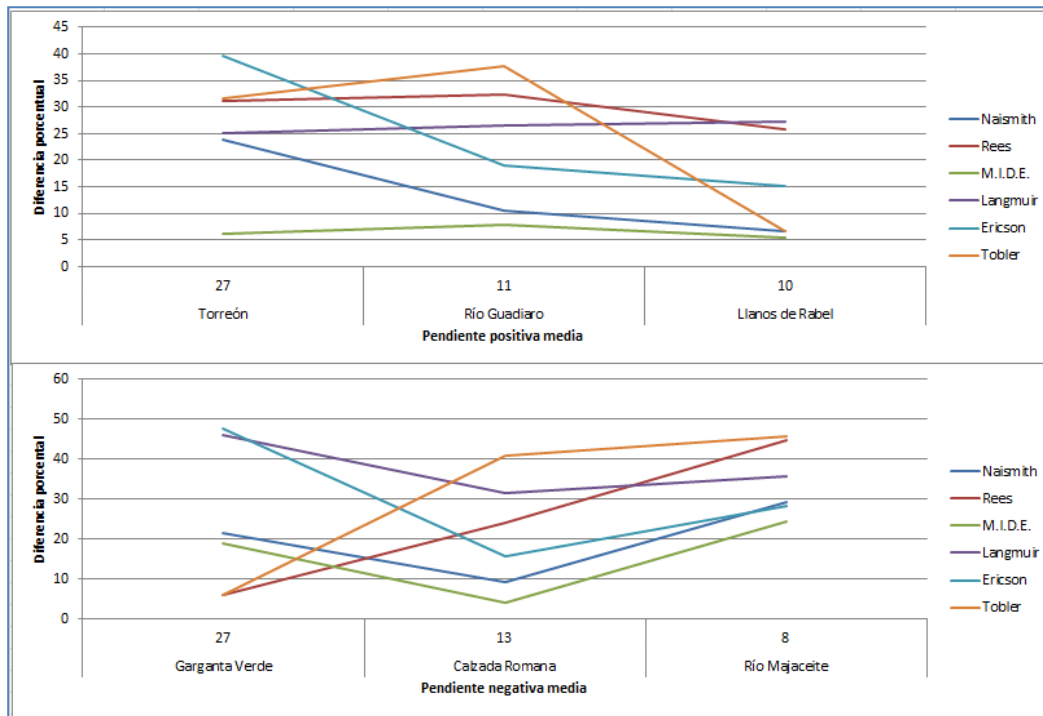


Figura 11: Relación entre diferencia porcentual y pendiente (positiva y negativa). Fuente: elaboración propia.

e) Comparación de los resultados globales de los métodos de cálculo

La figura 12 muestra que tanto el MIDE como el método de Naismith son los procedimientos que obtienen unas diferencias claramente inferiores, independientemente de la medida de contraste, y que, si bien el MIDE obtiene el menor error estimado global respecto a los tiempos medidos, su diferencia media se sitúa en torno a los 28 minutos.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): “Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos”, *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

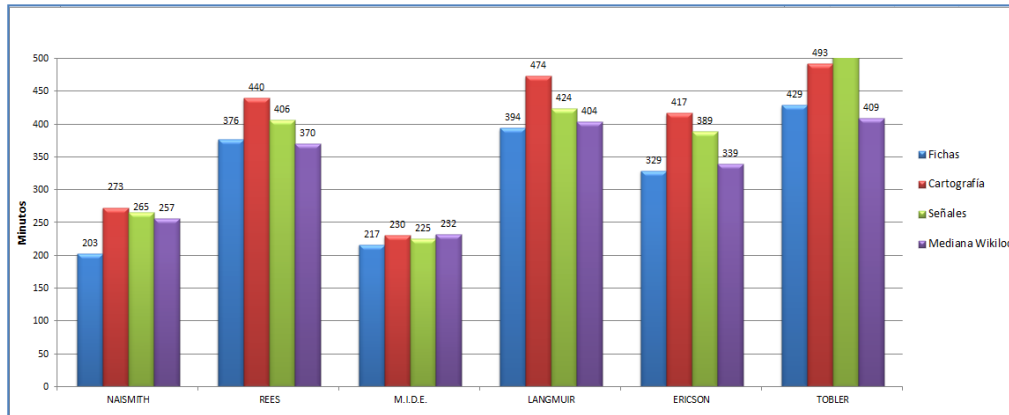


Figura 12: Diferencias absolutas globales entre valores temporales estimados y medidos. Fuente: elaboración propia.

La figura 13 muestra al MIDE cómo el método que presenta unos valores de diferencia más reducidos (en torno al 17%), mientras que el método de Naismith supera esta cifra en tres de los cuatro casos contrastados. Sus desviaciones estándar, por otra parte, permiten consolidar al MIDE como el método más regular.

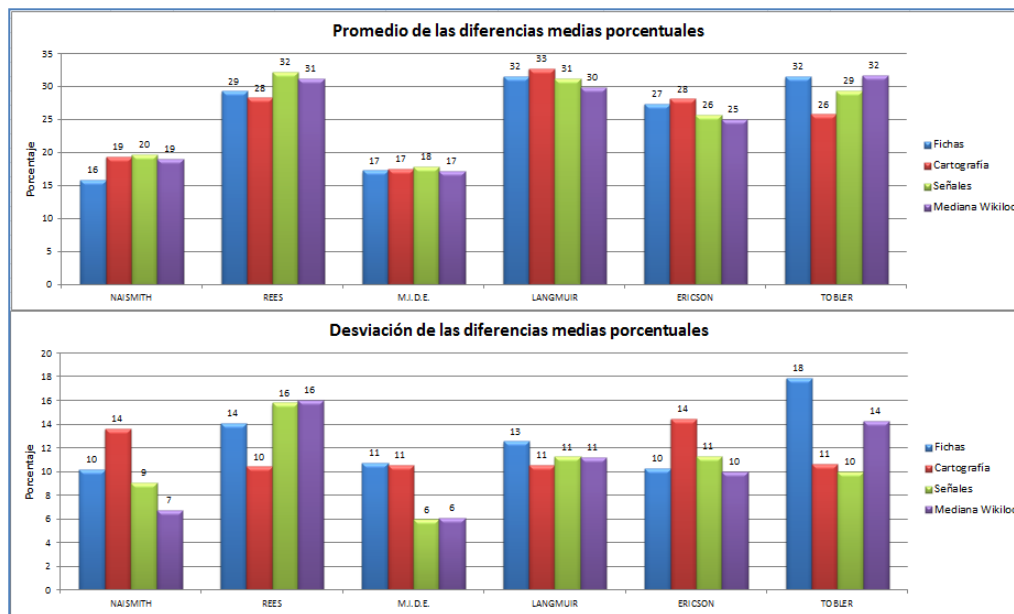


Figura 13: Estadísticos de las diferencias porcentuales globales entre valores estimados y medidos. Fuente: elaboración propia.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

7. Discusión

De forma previa a la discusión acerca de los resultados obtenidos habría que considerar la importancia del objetivo propuesto y la validez de la metodología aplicada en este trabajo; en este sentido, preguntarse si es útil predecir el tiempo de demora pedestre de rutas ya establecidas, y si es posible hacerlo con suficiente precisión, son cuestiones clave. En primer lugar, predecir el tiempo de demora es algo útil si se desea conocer este valor sobre rutas que aún no han sido creadas, o cuando interesa elegir de entre distintas combinaciones de rutas aquella que es óptima en función del tiempo; sin embargo, no es tan obvia su utilidad para el diseño de nuevas rutas, donde la medida del coste energético, más fácilmente contrastable a partir de los datos empíricos, y mejor medida del verdadero coste fisiológico que la mera velocidad (Jobe y White, 2009), es en general más empleada para el diseño de lo que se denominan rutas óptimas (Pandolf, 1976; Minetti *et al.*, 2002; Wood y Wood, 2006; Llobera y Slucking, 2007; Jobe y White, 2009; Leuthäusser, 2013; Herzog, 2013b), si bien autores como Fritz y Carver (1998), o la misma función de cálculo de coste mínimo acumulado *r.walk* integrada en el programa GRASS, la emplean con este mismo fin.

En segundo lugar, la discusión se centra en si es posible conocer con suficiente precisión el tiempo a emplear en realizar un recorrido pedestre y, aquí, la respuesta necesariamente depende del grado de precisión que se desee que, a su vez, también está relacionado con los factores y circunstancias considerados, así como con el grado de verosimilitud que posean los datos de contraste; la realización a pie de un itinerario concreto demora un determinado tiempo que difícilmente sería idéntico de repetir en las mismas circunstancias; a medida que éstas cambien también aumenta la probabilidad de que lo haga el valor de tiempo registrado, por lo que, finalmente, solo sería representativo del tiempo medido un valor estadístico. Estimar la demora de ese mismo trayecto a través de una función matemática genera un valor que podría coincidir con el estadístico anterior solo si han sido ponderadas adecuadamente las distintas variables que afectan a la velocidad de desplazamiento y se estima compleja la posibilidad de aplicar con éxito igual procedimiento a otras rutas pedestres. Los resultados obtenidos en este trabajo indican que, si bien es posible una estimación temporal precisa en casos particulares, la diferencia media entre datos medidos y calculados se aproxima, en el mejor de los casos, al 18%.

Las causas de las diferencias entre datos medidos y calculados, es decir, las causas del error obtenido, también son objeto de discusión; si se consideran correctos los datos de contraste (estadísticos de los datos medidos), podría pensarse que este error solo puede deberse al tipo y calidad de las variables consideradas y al modo en que se relacionan en la función; las variables aquí utilizadas se reducen a velocidad máxima, longitud y pendiente del recorrido.

La velocidad máxima, en el sentido de que sería la máxima alcanzada con el menor esfuerzo, ha sido determinada por los fisiólogos (Minetti *et al.*, 2002) en 3,96 km/h y, sin embargo, cuatro de los métodos analizados la superan ampliamente (hasta un máximo de 6 km/h en el caso de Tobler).

La medida de la longitud de la ruta posee una precisión que depende de la escala de la digitalización y de la calidad del soporte utilizado como base (usualmente, ortofotografías), si bien

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, nº 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

habría que considerar que, en cualquier caso, la longitud recorrida tiende a ser mayor que la modelada por un SIG (Kondo, 2011).

Para el cálculo de la pendiente es clave la precisión altimétrica del MDE, aunque habría que considerar su resolución espacial pues, como indican Hamer *et al.* (1995), un mayor tamaño de celdilla suaviza las pendientes reales, que la inercia puede provocar que un ligero cambio en el valor de pendiente no afecte, en principio, a la velocidad del caminante (Pingel, 2010) o que atravesar horizontalmente pendientes abruptas resulte más lento que ir por zonas planas (Arnett, 2009; Kay, 2012); sin embargo, también habría que considerar que, como afirma Herzog (2010), la función que calcula el coste sea más importante que la precisión y resolución de los datos altimétricos.

A todo ello habría que sumar la importancia del tipo de terreno atravesado por la ruta. Autores como Soule y Goldman (1972) han propuesto una relación entre tipo de superficie y proporción de la velocidad conservada, mientras que otros como Tobler o el mismo MIDE presentan modificaciones a su función dependiendo del tipo de firme; sin embargo, la diversidad de tipos de terrenos, la falta de una relación específica con la velocidad y, especialmente, la complejidad a la hora de localizar de forma precisa los límites de cada tipo, dificultan su integración en la función de cálculo del tiempo.

Los valores aportados por los métodos de cálculo del tiempo, así como los datos de contraste, son también cuestionables: el modo en que se relacionan las variables integradas en las funciones de cálculo viene representado por las seis funciones analizadas; sin embargo, que una función obtenga mejores resultados que otra, incluso en todos los casos contrastados, no significa necesariamente que su capacidad de modelar el tiempo sea superior y, dado que el error en el cálculo es significativo, habría que preguntarse cuál de las funciones empleadas es más susceptible de mejora a partir de pequeñas modificaciones en los valores de sus parámetros. En este sentido, la función de Tobler es la que parece recoger de forma más explícita un mayor número de parámetros relacionados con el cálculo de la velocidad en función de la pendiente, pues no solo permite modificar la velocidad máxima o la forma de la curva, sino también el valor de la pendiente a partir del cual la velocidad disminuye.

Respecto a los datos de contraste, que permiten valorar la calidad de los resultados obtenidos por las funciones de cálculo y, por tanto, la bondad de las funciones aplicadas, la cuestión es tanto su número como su calidad y homogeneidad; para testar los resultados generados por los métodos de cálculo se han empleado datos procedentes de dos tipos principales de fuentes: i) la primera es oficial (página *web* de la Consejería que gestiona los senderos de uso público), se supone una estimación realizada por expertos y, aunque no se conoce su representatividad, se le supone suficiente calidad, y la segunda (ii) son estadísticos extraídos de datos almacenados en una página *web*, generados a partir de un número de casos variado (entre 5 y 21), y cuya calidad no está contrastada. De ambas se desconoce su homogeneidad, es decir, si pueden considerarse realizados por el mismo grupo de individuos, aunque posiblemente sea más heterogéneo el segundo caso que el primero, ya que no es tan fácil que senderistas que registran rutas de baja dificultad también lleven a cabo las de dificultad alta, como que los técnicos encargados de realizar la medida del tiempo pertenezcan al mismo conjunto.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", GeoFocus, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

En último lugar, los resultados obtenidos también son, hasta cierto punto, objeto de discusión: i) los métodos de Naismith y Tobler han sido criticados por la alta velocidad que le suponen al caminante y, si bien suelen calcular tiempos inferiores a los medidos, sus resultados son muy diferentes, ajustándose el primero mucho más a los datos de contraste que el segundo; ii) el ángulo de la pendiente en el que se alcanza la máxima velocidad es, para la mayoría de las funciones igual a 0°, lo que no concuerda con los datos empíricos obtenidos por los fisiólogos; sin embargo, la función de Tobler, donde se propone que este valor se sitúe en valores más próximos a los estimados por ellos, no se encuentra entre las que obtienen un mejor resultado; iii) no parece existir una gran diferencia entre los resultados obtenidos por los métodos isotrópicos y los anisotrópicos, pareciendo ser más importante la función de cálculo en sí que el método empleado para tratar la anisotropía de la pendiente.

8. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que el tiempo a emplear en recorrer un sendero determinado puede, en casos concretos, ser estimado con gran precisión por un método concreto, pero también muestran que, cuando este mismo método es aplicado a un sendero diferente (sin que necesariamente sea de distinto tipo), las diferencias pueden llegar a ser importantes. De hecho, el método que menor error obtiene difiere en más de un diez por ciento, de media, del valor medido.

Los métodos de cálculo estiman, por lo general, un tiempo claramente inferior a los medidos y esto puede deberse tanto a una función de cálculo, que sobreestima la velocidad, como a una menor longitud o pendiente recorrida. En el primer caso hay que considerar que la velocidad en el llano asociada a la mayoría de los métodos es ligeramente superior a la medida por los fisiólogos. En el segundo caso, la longitud del trazado digital puede ser inferior a la real, debido a la dificultad de representar adecuadamente la sinuosidad de los senderos, en general, y la de ciertos recorridos, normalmente asociados a fuertes pendientes, en particular.

El método de Naismith y el propuesto por la FEDME (MIDE) son los que calculan con mayor precisión el tiempo de demora de un recorrido y, si bien esta precisión no es muy alta, sí es bastante superior a la que ofrecen los restantes métodos. El MIDE, en concreto, posee una mayor fiabilidad para ser empleado en la predicción del tiempo a emplear en un recorrido pues, tanto la suma de sus diferencias absolutas respecto a los datos medidos es la menor como registra la mínima media y desviación de las diferencias porcentuales respecto a ellos. El método de Ericson y Goldstein se muestra, casi en todas las ocasiones, superior a los de Rees, Tobler y Langmuir.

No existen grandes diferencias entre los resultados obtenidos por métodos isotrópicos y anisotrópicos y, de hecho, los dos métodos que mejor resultado obtienen son de diferente tipo; en este sentido, como ya apuntaba Herzog (2010), parece más importante la función de cálculo en sí que el modo en que se relaciona la velocidad con el signo de la pendiente. En esta línea, tampoco parece existir una fuerte relación entre algún método en particular y un tipo de pendiente concreto.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, nº 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

Parece necesario profundizar en las causas de la excesiva divergencia entre tiempos calculados y medidos; en futuros estudios se recomendaría: i) utilizar una mayor cantidad y variedad de senderos; ii) capturar datos más precisos respecto a su planimetría y altimetría; iii) emplear una mayor cantidad de datos de contraste. Por otra parte, la estimación del tiempo se vería mejorada si fuese posible: i) clasificar los tipos de firme por su impedancia y, una vez adecuadamente delimitados, integrarlos en la función de cálculo; ii) profundizar en el diseño de las funciones de cálculo, ya sea a partir de la modificación de los valores de sus parámetros o ideando nuevas relaciones entre ellos.

En definitiva, prever el tiempo de demora es útil, y no solo para conocer con antelación lo que tardaría en realizarse una ruta pedestre concreta, sino, especialmente, para investigar la mejor opción para ir de un punto a otro a través de una red de caminos pues, aun viéndose afectado el procedimiento por la falta de precisión en el cálculo del tiempo, permite tanto elegir aquella combinación que supone un tiempo mínimo como conocer la longitud que puede ser recorrida en un determinado tiempo, a partir de un punto inicial. Es aquí donde cobra sentido indagar acerca de cuál de los métodos y funciones existentes para el cálculo de la demora pedestre se ajusta mejor a datos empíricos derivados de rutas de muy diferentes características y es en el campo del análisis de redes de transporte donde puede ser aplicado con mayor eficacia.

Agradecimientos

La posibilidad de contar con datos relativos al trazado, altimetría y tiempo de recorrido de múltiples rutas pedestres ha permitido que este trabajo haya podido llevarse a cabo de forma mucho más satisfactoria; por esta razón, los autores agradecen su labor al Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA), a la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía, al fundador de la aplicación gratuita *Wikiloc*, Jordi Ramot, y a todos aquellos que almacenan y comparten rutas georreferenciadas en este medio.

Referencias bibliográficas

- Aitken, R. (1977): *Wilderness areas in Scotland*, PhD Thesis, Aberdeen University.
- Arnett, F. (2009): "Arithmetical route analysis with examples of the long final courses of the World Orienteering Championship 2003 in Switzerland and 2005 in Japan", *Scientific Journal of Orienteering*, 17, pp. 4-21.
- Bennet, D. (1985): *The Munros: The Scottish Mountaineering Club Hillwalkers' guide*, Leicester: Cordee, Scottish Mountaineering Trust.
- Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía (1998): *Manual de señalización de Uso Público*, EGMASA.
- Disley, J. (1972): *Orienteering*, London, Faber & Faber.
- Drakos, N. (1998): "The shortest path algorithm", Cornell University.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, nº 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

Ericson, J. E. y Goldstein, R. (1980): "Work space: a new approach to the analysis of energy expenditure within site catchments", *Antropology*, UCLA, 10 (1 & 2), pp. 21-30.

FAM (Federación Aragonesa de Montañismo) (2003): *Manual MIDE*, [Consulta: 01-10-2014]. Disponible en: <http://www.montanasegura.com/MIDE/manualMIDE.pdf>.

FEDME (Federación Española de Deportes de Montaña y Escalada) (2012): *Senderos señalizados y desarrollo rural sostenible*. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. [Consulta: 01-10-2014]. Disponible en http://www.fedme.es/salaprensa/upfiles/608_F_es.pdf.

Fritz, S. y Carver, S. (1998): "Accessibility as an important wilderness indicator: modelling Naismith's rule", *GISRUK'98*. [Consulta: 01-10-2014]. Disponible en <http://www.geog.leeds.ac.uk/papers/98-7/>.

Fontanari, S. (2001): *Sviluppo di metodologie Gis per la determinazione dell'accessibilità territoriale come supporto alle decisioni nella gestione ambientale*, Tesis Doctoral Facoltà di Ingegneria- Universtá di Trento, 129 págs.

Hamer *et al.* (1995): "Slope class maps from soil survey and digital elevation models", *Soil Science Society of America Journal*, 59 (2), pp. 509-519.

Herzog, I. (2010): "Theory and practice of cost functions", en *CAA*, pp. 431-34.

Imhof, E. (1952): *Gelände und Karte*. Rentsch. Erlenbach bei Zurich.

Jobe, R. y White, P.S. (2009): "A new cost-distance model for human accessibility and a evaluation of accessibility bias in permanent vegetation plots in Great Smoky Mountains National Park, USA", *Journal of vegetation science*, 20, pp. 1099-1109.

Kay, A. (2012): "Route choice in hilly terrain", *Geographical Analysis*, 44 (2), pp. 87-108.

Kennedy, P. (1988): *Wilderness rules*. [Consulta: 10-07-2013]. Disponible en: <http://www.gillean.demon.co.uk /Naismith/Naismith.htm>.

Kondo, Y. *et al.* (2011): "A preliminary report for the Gps-aided walking experiments for remodelling prehistoric pathways at Kozushima island (east Japan)", *On the road to reconstructing the past: computer applications and quantitative methods in archaeology*, Proceedings of the 36th International Conference, Budapest, 2008, pp. 332-338.

Langmuir, E. (1984): *Mountaineering and leadership: a handbook for mountaineers and hillwalking leaders in the British Isles*, The Scottish Sport Council. Edimburgh.

Leuthäusser, U. (2013): *About walking uphill: time required, energy consumption and the zigzag transition*. [Consulta: 5-10-2014]. Disponible en: http://sigmadewe.com/fileadmin/user_upload/pdf-Dateien/Bergaufgehen_engl.pdf.

Llobera, M. y Sluckin, T. J. (2007): "[Zigzagging: Theoretical insights on climbing strategies](#)", *Journal of Theoretical Biology*, 249 (2), 206-217.

Margaria, R. (1938): "Sulla fisiología e specialmente sul consumo energético della marcia e della corsa a varia velocità ed inclinazione del terreno", *Att Acc Naz Lincei*, 7, pp. 299-368.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, nº 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

- Margaria, R. (1976): "Biomechanics and energetics of muscular exercise", Clarendon Press, Oxford.
- Minetti, A. E. *et al.* (2002): "Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes", *Journal of Applied Physiology*, 93 (3), pp. 1039-1046.
- MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente) (2014): *Estudio de la situación de los caminos naturales e itinerarios no monitorizados en la Unión Europea*. Consulta: 09-08-2014]. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/>.
- Naismith, W. W. (1892): Untitled, *Scottish Mountaneering Club Journal*, 2, 135.
- Pandolf, K.B.; Haisman, M.F. y Goldman, R.F. (1976): "Metabolic energy expenditure and terrain coefficients for walking on snow", *Ergonomics*, 19 (6), pp. 683-90.
- Pandolf, K.B.; Giboni, G.B. y Goldman, R.F. (1977): "Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly", *Journal of Applied Physiology*, 43, pp. 577-581.
- Pingel, T. J. (2010): "Modeling slope as a contributor to route selection in mountainous area", *Cartography and Geographic Information Science*, 37 (2), 137-148.
- Paris Roche, F. (2002): *Método de Información para Excursiones (MIDE)*, Federación Aragonesa de Montañismo (FAM).
- Rees, W. (2003a): "Naismith rule overhauled", *Scottish Mountaneering Club Journal*, submitted for publication.
- Rees, W. (2003b): "Least cost in mountainous terrain", *Computers and Geosciences*, 30 (3), 203-209.
- Saibene, F. y Minetti, A. (2002): "Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans", *Journal of Applied Physiology*, 88 (4-5), pp. 297-316.
- Santee, W.R., Allison, W.F. Blanchard, L.A., y Small, M.G. (2001): "A proposed model for load carriage on sloped terrain", *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 72 (6), pp. 562-566.
- Scarf, P. (2007): "Route choice in mountain navigation, Naismith's rule, and the equivalence of distance and climb", *Journal of Sports Sciences*, 25 (6), pp. 719-726.
- Soule, R. y Goldman, R. (1972): "Terrain coefficients for energy cost prediction", *Journal of Applied Physiology*, 32, pp. 706-708.
- Tobler, W. (1991): *Non-isotropic geographic modeling*. Technical report.
- Weathley, D. y Gillings, M. (2002): *Spatial technology and archaeology. The archaeological applications of GIS*, Taylor and Francis, London, New York.
- White, D.A. y Barber, S.B. (2012): "Geospatial modeling of pedestrian transportation networks: a case study from pre-Columbian Oaxaca, Mexico", *Journal of archaeological science*, 39, pp. 2684-2696.

Márquez Pérez, J., Vallejo Villalta, I. y Álvarez Francoso, J. I. (2015): "Estimación del tiempo de demora en rutas pedestres: comparación de algoritmos", *GeoFocus*, n° 15, p. 47-74. ISSN: 1578-5157

White, D.A. (2012): *Transportation, integration, facilitation: Prehistoric trail networks of the western Papaguería: a multifaceted least cost analysis of social landscapes: archaeological case studies*, University of Utah Press, Salt Lake City.

Wood, B. M. y Wood, Z. J. (2006): "Energetically optimal travel across terrain: visualizations and a new metric of geographic distance with archaeological applications", en *SPIE Proceedings: San Jose, CA*, vol. 6060.

Wood, N. J. y Schmidlein, M. C. (2012): "Anisotropic path modeling to assess pedestrian-evacuation potential from Cascadia-related tsunamis in the US Pacific Northwest", *Natural Hazards*, 62, Springer, pp. 275-300.

¹ <http://es.wikiloc.com/wikiloc/home.do>

² GRASS (Geographic Resources Analysis Support System). U. S. Army Corps of Engineers' Construction Engineering Research Laboratory (USA/CERL). Champaign, Illinois.

³ ESRI (Environmental System Research Institute) (2010): "ARCGIS ver. 10", Redlands, CA. ESRI Press.