

FALLAS ACTIVAS Y SISMICIDAD EN LAS PARTES ALTAS DE LA CIUDAD DE GRANADA: COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA FORMACIÓN ALHAMBRA



J.M. Azañón^{1,2}, M.J. Rodríguez-Peces³, J. García-Mayordomo⁴, J.L. de Justo-Alpañés⁵

¹Dpto. de Geodinámica, Universidad de Granada, Campus de Fuentenueva s/n, 18071 Granada. jazanon@ugr.es

²Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (UGR-CSIC), Granada.

³Dpto. de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28040-Madrid. martinjr@geo.ucm.es

⁴Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/La Calera, 1. 28760. Tres Cantos (Madrid). julian.garcia@igme.es

⁵Dpto. de Medios Continuos. E.T.S. de Arquitectura. Universidad de Sevilla. jjj@us.es

RESUMEN

En este trabajo se caracteriza el comportamiento dinámico de la Formación Alhambra mediante un análisis de estabilidad del Tajo de San Pedro, localizado al pie del monumento de la Alhambra (Granada). La Formación Alhambra está formada principalmente por conglomerados de edad Plioceno-Pleistoceno inferior con un espesor de al menos 200 m. En esta formación se localizan numerosas fallas normales con dirección NO-SE predominante. Muchas de estas fallas presentan una actividad reciente, pudiendo ser relacionada con la ocurrencia de terremotos en la zona. La peligrosidad de estos eventos sísmicos debe ser considerada como moderada, ya que existen numerosos registros históricos en los que los daños producidos en los muros de la Alhambra son relacionados con la actividad sísmica. Por otra parte, estas fallas también representan discontinuidades mecánicas que contribuyen a la reducción de la estabilidad del conjunto del macizo rocoso. Este es el caso del Tajo de San Pedro, cuyo escarpe lateral constituye el plano de una de estas fallas. Los conglomerados de la Formación Alhambra son un sustrato rocoso firme y resistente con valor de aceleración crítica elevado ($a_c=0.51g$), lo que evita que se produzcan importantes inestabilidades de ladera de origen sísmico.

Palabras clave: Aceleración crítica, Alhambra, Cuenca de Granada, Deslizamiento, Falla activa, Newmark

SUMMARY

We study the dynamic behaviour of the Alhambra Formation by means of a slope stability analysis of the Tajo de San Pedro slope, which is located at the bottom of the Alhambra monument (Granada). The Alhambra Formation is formed mainly by conglomerates of Pliocene to Lower Pleistocene age, and has a thickness of at least 200 m. This formation is affected by a number of normal faults trending NW-SE. Many of these faults show evidence of recent activity and so they could be responsible of the occurrence of past earthquakes in the area. In fact, damage to the walls of the Alhambra has been related many times to the occurrence of earthquakes. Additionally, these faults also play as mechanical discontinuities that contribute to reducing the stability of the rock mass. This is the case of the Tajo de San Pedro slope, one of its lateral faces being a fault scarp. The conglomerates of the Alhambra Formation are a firm and resistant bedrock that shows a high critical acceleration value ($a_c=0.51g$), which reduces the likelihood of a instability triggered by an earthquake.

Keywords: Active fault, Alhambra, Critical acceleration, Granada Basin, Landslide, Newmark

Introducción

La preservación del patrimonio histórico puede verse seriamente afectada en poblaciones cuyas edificaciones están construidas en el borde de laderas abruptas y sometidas a frecuentes inestabilidades de ladera. Un exponente de esta problemática es el Tajo de San Pedro (Fig. 1), cuya proximidad a la muralla-palacio de la Alhambra (Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO) puede llegar a afectar a la integridad de esta edificación. Los desprendimientos y los desplazamientos de algunas fallas normales han destruido ya una parte importante de la valla cristiana, construida en 1526.

La Alhambra está construida en la cima de una colina, cuyo pie se encuentra rodeado por el río Darro en su lado norte (Fig. 1). La colina de la Alhambra está constituida por materiales de la denominada Formación Alhambra, de edad Plioceno superior a Pleistoceno inferior. Esta formación sedimentaria está constituida por conglomerados con niveles arenoso-pelíticos. El espesor de la formación en el entorno de la Alhambra es de unos 350 m. El color característico de estos sedimentos es el rojo, pero también existen algunos tramos grisáceos. Los conglomerados afloran en bancos sub-horizontales de potencia variable, de 2 a 5 m en las partes más bajas de la formación y de 15 a 30 m en las partes más altas. Los cantos son redondeados y heterométricos, con un tamaño medio de 10 cm. La matriz, cuya proporción es de 13-35 %, es de naturaleza areno-limosa, a veces arcillosa. Existen también capas de arcilla limosa, intercaladas en los conglomerados, de entre 0,5 y 2 m de espesor que se presentan a modo de lentejones. Todos los materiales de la Formación Alhambra se corresponden con sedimentos propios de abanicos aluviales que se formaron durante la intensa erosión de Sierra Nevada y los relieves circundantes, y que están constituidos por cantos de origen metamórfico (esquistos y cuarcitas) del Complejo Nevado-Filábride y cantos carbonatados del Complejo Alpujárride.



Figura 1. Vista panorámica del Tajo de San Pedro situado bajo el recinto amurallado de la Alhambra y frente a la Iglesia de San Pedro y San Pablo, con el río Darro a su pie. La foto ha sido tomada hacia el sur.

Desde el punto de vista tectónico, el régimen extensional de dirección NO-SE que caracteriza esta zona (borde nororiental de la Cuenca de Granada) desde el Tortonense (Galindo-Zaldívar et al., 1999) ha favorecido que el macizo rocoso constituido por la Formación Alhambra se encuentre compartimentado mediante varias familias de fallas normales a partir del Pleistoceno medio-superior, siendo NO-SE la dirección predominante

(Fig. 2). Algunas de estas fallas siguen siendo claramente activas en la actualidad (Azañón et al., 2004), por lo que la sismicidad asociada a su movimiento es un factor adicional a tener en cuenta con respecto a la estabilidad de las laderas y las edificaciones. En la actualidad algunas de estas fallas constituyen las paredes del Tajo de San Pedro, prolongándose bajo el recinto monumental. Entre ellas destaca una que constituye la cara oeste del Tajo de San Pedro (Figs. 1 y 2), cuya dirección y buzamiento es N158°E y 70°NE, respectivamente.



Figura 2. Esquema del recinto de la Alhambra y las zonas próximas, en la que se han representado las principales fallas. Obsérvese el meandro que forma el río Darro a la altura del Tajo de San Pedro.

Sismicidad

La actividad sísmica en la Cuenca de Granada es alta, con un gran número de terremotos instrumentales, pero de magnitud moderada a baja ($m_b \leq 5.5$) (De Miguel et al., 1989). Además en esta región se han producido significativos terremotos históricos, llegando a alcanzar intensidades elevadas ($I_0 > X$) y provocando cuantiosos daños a las poblaciones de Granada. Los más relevantes se produjeron durante los siglos XV y XIX (Feriche y Botari, 2002): Granada en 1431 ($I_0 = IX$), Granada en 1526 ($I_0 = VIII$), Pinos Puente en 1806 ($I_0 = IX$) y Arenas del Rey en 1884 ($I_0 = X$). Los últimos terremotos más significativos sentidos en la Cuenca de Granada son los terremotos de Albolote en 1956 y Jayena en 1984 con magnitudes $M_w = 4.9$ y $M_w = 5.0$ (Vidal, 1986; Morales et al., 1996), respectivamente.

Entre los eventos sísmicos que pudieron tener cierta relevancia para la estabilidad de la Formación Alhambra en el entorno del Tajo de San Pedro, se tienen datos históricos de los siguientes:

- Granada en 1431 ($I_0 = IX$). "En este tiempo tremió la tierra en el Real é mas en la cibdad de Granada, é mucho más en el Alhambra, donde derribó algunos pedazos de la cerca della". Este terremoto afectó al campamento de Juan II de Castilla que sitiaba la Alhambra al pie de Sierra Elvira durante la Batalla de Higuera (1/7/1431).
- SO Almería en 1522 ($I_0 = IX$). El 22 de septiembre cuarteó las torres de La Alhambra ($I = VI$).
- 1612. Se le atribuye la caída de 50 tapias de muralla desde la puerta principal al monasterio de los Mártires.
- 1734. Produjo una profunda grieta en la cara este de la Torre de Comares y hundió la muralla de la Puerta del Carril.
- Granada en 1822 ($I_{EMS} = VII$). Se produjo el 29 de julio causando daños en la Torre de Comares y otras construcciones.

Evolución del Tajo de San Pedro

El Tajo de San Pedro es el resultado de los efectos combinados a lo largo del tiempo de las avenidas del río Darro, la tectónica, la erosión y las filtraciones procedentes de la Alhambra. La erosión fluvial de las laderas de la colina de La Alhambra durante las crecidas del río Darro ha sido favorecida por las fallas y fracturas producidas en ella por el régimen tectónico de extensión. De este modo, estas riadas han creado un meandro convexo hacia el Tajo de San Pedro (Fig. 2), favoreciendo la socavación del pie de la ladera y la posibilidad de que se produzcan desprendimientos a partir de la cabecera del mismo.

La primera evidencia registrada de inestabilidad en el Tajo de San Pedro ocurrió en 1524, cuando un incendio destruyó la vegetación de la colina de La Alhambra, dejando el suelo sin protección superficial. Después de esta fecha, hay al menos siete inestabilidades documentadas entre los años 1600 y 1815 (Rodríguez Ortiz, 1998). Las causas citadas son las crecidas del río, aunque en los casos más recientes el problema se asocia a las filtraciones de agua vertida por los depósitos de la Alhambra. La última inestabilidad de ladera relevante se produjo en 1985 a consecuencia de la caída de una laja sub-vertical en la pared occidental.

En la actualidad, la altura del Tajo de San Pedro sobre el río es de 65,5 m y la distancia horizontal desde el borde del mismo hasta la muralla de la Alhambra es de 23,8 m. El tramo superior del talud tiene una altura de 45,5 m con una pendiente de 67°. En el pie del talud existen derrubios que evidencian que la erosión del Tajo de San Pedro sigue activa. Además las numerosas fracturas extensionales presentes en la Formación Alhambra producen una reducción de las tensiones horizontales y representan un camino preferente para las filtraciones de agua que llegan desde la Alhambra. La combinación de estos dos factores provoca que disminuya la resistencia del macizo rocoso en su conjunto. A pesar de que el retroceso del borde puede tardar muchos años en llegar a la muralla de la Alhambra, la evolución de la ladera muestra que la velocidad del proceso no es constante, pudiendo ser acelerada por grandes inundaciones o por la ocurrencia de un terremoto importante.

Caracterización geotécnica de la Formación Alhambra

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) realizó varios sondeos en la zona del Tajo de San Pedro (CEDEX, 1993). Una investigación más profunda fue realizada por Geocisa (2002), como parte del Proyecto de Restauración del Tajo de San Pedro (Justo et al., 2005). En esta investigación del terreno se perforaron dos nuevos sondeos, sobre los que se realizaron ensayos de permeabilidad, de penetración, presiométricos, down-hole y cross-hole y se obtuvieron muestras para los ensayos de laboratorio. A partir de esta información se ha obtenido los parámetros geotécnicos representativos de los materiales de la Formación Alhambra presentes en el Tajo de San Pedro (Tabla 1), que comprenden: a) conglomerados muy densos (40 m de potencia), b) conglomerados de densidad moderada (3 m de potencia), y c) conglomerados con gravas, arenas y limos (>23 m de potencia).

Tabla 1. Resumen de las propiedades geotécnicas de la Formación Alhambra. γ , Peso específico aparente; c' , Cohesión efectiva; ϕ' , Ángulo de fricción efectivo; v_s , velocidad de ondas de cizalla.

Material	USCS	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	v_s (m/s)
Conglomerados muy densos	GC-GM	22	94	39	800-960
Conglomerados de densidad moderada	SM	21	98	37	800
Conglomerados con gravas, arenas y limos	GM SC-SM	23	84	44	1150

A partir de los valores de velocidad de ondas de cizalla de estos materiales se ha estimado una v_s^{30} de 960 m/s para el conjunto de la Formación Alhambra. Este valor está relacionado con materiales de tipo roca dura con fracturas ($v_s^{30}=800-1500$ m/s) para los cuales los efectos de amplificación sísmica debida a efectos de suelo son nulos, al tratarse de un sustrato rocoso estable y muy rígido.

Análisis de estabilidad del Tajo de San Pedro

La Formación Alhambra forma parte del relleno sedimentario de la Cuenca de Granada, que es el área con mayor actividad sísmica en España. Una serie de terremotos importantes han ocurrido en esta zona desde tiempos históricos y, por lo tanto, el efecto sísmico debe ser incluido en el análisis de estabilidad de taludes y el diseño de estructuras de ingeniería, mediante el uso tanto de las normativas sísmicas oficiales (ej. Norma de Construcción Sismorresistente Española; NCSE-02, 2002) como de estudios específicos de peligrosidad sísmica (cf. Rodríguez-Peces, 2010). La aceleración sísmica mínima necesaria para superar la resistencia al corte y el inicio de un deslizamiento se puede calcular siguiendo el método propuesto por Newmark (1965):

$$a_c = (FS - 1) g \operatorname{sen} \alpha \quad (1)$$

donde a_c es la aceleración crítica (en unidades de gravedad, $1g=9.81$ m/s²), g es la aceleración de la gravedad, FS es el factor de seguridad estático y α es el ángulo entre la vertical y una línea que une el centro de gravedad del deslizamiento y el centro del círculo de rotura.

El análisis de estabilidad del Tajo de San Pedro se ha realizado mediante el programa Slide 5.0 (Rocscience Inc., 2003) considerando el método de equilibrio límite de Morgenstern-Price (Fig. 3). La superficie de rotura circular más probable presenta un factor de seguridad estático estable ($FS=1.71$). Teniendo en cuenta esta superficie, hemos estimado un ángulo α de 46°, de modo que la aceleración crítica obtenida mediante la ecuación (1) es de 0.51g. Este valor tan elevado de aceleración crítica indica que los materiales de la Formación Alhambra son muy poco susceptibles a las vibraciones sísmicas del entorno.

La Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02, 2002) considera como construcciones de especial importancia las construcciones catalogadas como monumentos históricos o artísticos, como es el caso de la Alhambra y su entorno (Patrimonio de la Humanidad). Según esta norma, el valor de aceleración sísmica máxima en roca (*Peak Ground Acceleration*, PGA) que debe ser considerada es la correspondiente a un periodo de retorno de 1000 años ($PGA=0.28g$). Además, los efectos de amplificación sísmica son nulos al estar la Alhambra construida sobre la Formación Alhambra, que es un sustrato rocoso bastante rígido. Por tanto, en el análisis de estabilidad del Tajo de San Pedro debe considerarse el escenario sísmico probabilista descrito anteriormente. El valor de aceleración crítica obtenida en el Tajo de San Pedro ($a_c=0.51g$) resulta ser casi el doble más elevado que la PGA obtenida según la norma, por lo que la Formación Alhambra permanecería estable teniendo en cuenta esta aproximación probabilista.

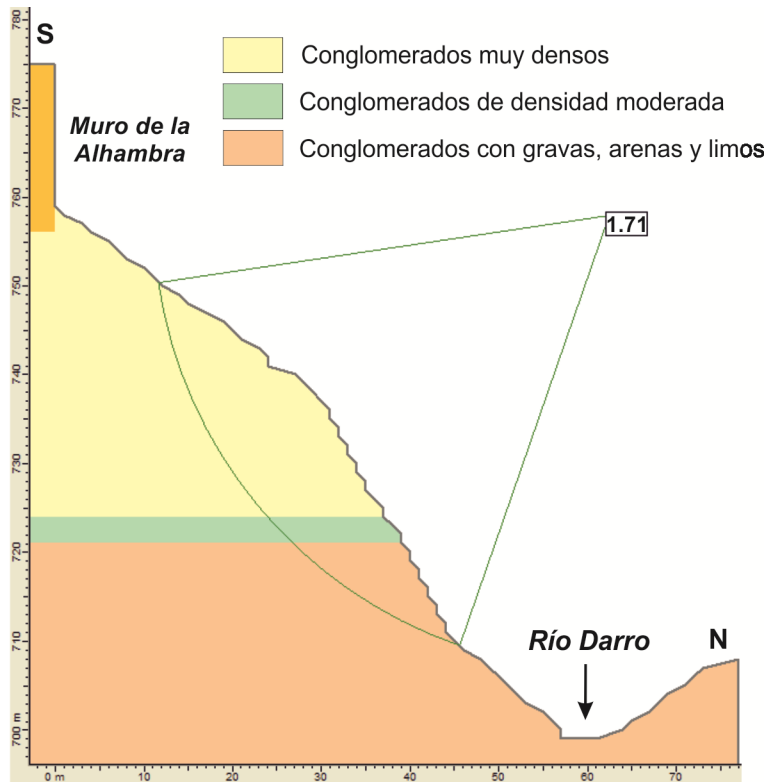


Figura 3. Superficie de deslizamiento crítica para la rotura del Tajo de San Pedro en condiciones estáticas. Obsérvese como el factor de seguridad es estable.

Conclusiones

El Tajo de San Pedro es el resultado de la intersección de dos planos de discontinuidad presentes en la Formación Alhambra, cuya proximidad al monumento histórico de la Alhambra supone un peligro para ésta. El Tajo de San Pedro está rodeado por numerosas fallas activas normales con dirección NO-SE, siendo una de las caras del Tajo un escarpe de falla sometido a procesos de erosión. Además, el contexto tectónico extensional actual de dirección preferente NO-SE, favorece que se produzcan nuevas discontinuidades mecánicas (fracturas y desprendimientos) que contribuyen por relajación a la reducción de la estabilidad del conjunto del macizo rocoso constituido por la Formación Alhambra.

Los conglomerados de la Formación Alhambra, sobre los que se cimienta la Alhambra, resultan ser unos materiales lo suficientemente densos y rígidos como para considerarlos, a efectos prácticos, como un sustrato rocoso firme y resistente ante las posibles inestabilidades de ladera generadas por terremotos. La aceleración crítica obtenida en el análisis de estabilidad del Tajo de San Pedro ($a_c=0.51g$) es relativamente elevada, indicando que en la Formación Alhambra no se producirían inestabilidades de ladera de gran magnitud considerando los valores de aceleración sísmica máxima más probables en la zona. Este hecho concuerda con los datos históricos, ya que los daños causados por los terremotos siempre se han relacionado con elementos estructurales de la Alhambra, no haciendo mención de la Formación Alhambra.

Referencias

- Azañón, J.M., Azor, A., Booth-Rea, G. y Torcal, F. (2004), "Small-scale faulting, topographic steps and seismic ruptures in the Alhambra (Granada, southeast Spain)". *J Quaternary Sci*, 19, 219-227.
- CEDEX (1993), "Caracterización geotécnica del conjunto monumental de La

- Alhambra y Generalife". Informes parciales nº 1, 2 y 3.
- De Miguel, F., Vidal, F., Alguacil, G., y Guirao, J.M. (1989), "Spatial and energetic trends of the microearthquakes activity in the Central Betics". *Geodinamica Acta*, 3, 87-94.
 - Feriche, M. y Botari, C. (2002), "Base de datos de sismos históricos. In Primer Centenario del Observatorio de Cartuja". Cong. 100 años Sismología Granada. Univ. de Granada (CD-ROM).
 - Galindo-Zaldívar, J., Jabaloy, A., Serrano, I., Morales, J., González-Lodeiro, F., Torcal, F. (1999), "Recent and present-day stresses in the Granada Basin (Betic Cordilleras): example of a late Miocene-present-day extensional basin in a convergent plate boundary". *Tectonics*, 18, 686-702.
 - Geocisa (2002), "Reconocimientos geotécnicos del tajo de San Pedro, Granada". Anejo nº 3 del 'Proyecto de restauración del Tajo de San Pedro de La Alhambra de Granada'. Conf. Hidrográfica del Guadalquivir y Patronato de La Alhambra y Generalife.
 - Justo, J.L., Vázquez, N. y Durand, P. (2005), "Proyecto de restauración del Tajo de San Pedro de La Alhambra de Granada". Conf. Hidrográfica del Guadalquivir y Patronato de La Alhambra y Generalife.
 - Justo, J.L., Azañón, J.M., Azor, A., Saura, J., Durand, P., Villalobos, M., Morales A. y Justo, E. (2008), "Neotectonics and slope stabilization at the Alhambra, Granada, Spain". *Eng Geol*, 100, 101-119.
 - Morales, J., Singh, S.K. y Ordaz, M. (1996), "Analysis of the Granada (Spain) earthquake of 24 June, 1984 (M=5) with emphasis on seismic hazard in the Granada Basin". *Tectonophysics*, 257, 253-263.
 - NCSE-02 (2002), "Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación". Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. B.O.E. 11 octubre 2002, 35898-35967.
 - Newmark, N.M. (1965), "Effects of earthquakes on dams and embankments". *Geotechnique*, 15, 139-160.
 - Rocscience Inc. (2003), "Slide 5.0 User's Guide". Part I. 199 pp.
 - Rodríguez Ortiz, J.M. (1998), "El Tajo de San Pedro de La Alhambra de Granada". Inf. no publicado.
 - Rodríguez-Peces, M.J. (2010), "Analysis of earthquake-triggered landslides in the South of Iberia: Testing the use of the Newmark's method at different scales". Tesis doctoral, Univ. de Granada, 254 pp.
 - Vidal, F. (1986), "Sismotectónica de la región Bética-Mar de Alborán". Tesis doctoral, Univ. de Granada, 450 pp.