

# ADATOK A MAGASHEGYI SIVATAG FELSZÍNE ALÓL – AVAGY VÍZ ÉS JÉG A FÖLD LEGSZÁRAZABB MAGASHEGYÉN, AZ OJOS DEL SALADÓN

Nagy Balázs (1), Mari László (1), Kovács József (2),  
Nemerkényi Zsombor (3), Heiling Zsolt (4)

- (1) ELTE Természetföldrajzi Tanszék, e-mail: nagybalazs@caesar.elte.hu
- (2) ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék
- (3) MTA CSFK Földrajztudományi Kutatóintézet
- (4) A Földgömb az Expedíciós Kutatásért Alapítvány

## Bevezetés

A Földgömb az Expedíciós Kutatásért Alapítvány 2012-ben indította el magashegyi környezetváltozás-monitoring vizsgálatát Chilében, az Ojos del Salado (6893 m) térségében. A cél a klímaváltozás okozta átalakulások pontos feltárása a Száraz-Andok legmagasabb részén. A kutatási helyszín környezeti extremitása ismert ugyan, de működési sajátosságai, pontos adatai még rejtve maradtak. E vizsgálat a terepi adatgyűjtéssel, majd a feldolgozással az olyan környezeti paraméterekről (elsősorban a hegyi sivatagról, a periglaciális környezetről és a permafrosztról) ad alapinformációkat, amelyek változásai egyben a klímaingadozás dinamizmusának, következményeinek jelzői is.

A jégdegradációt és az olvadékvíz-utánpótlás jellegzetességeit feltáró kutatás első lépéseként 2012-ben 4200 m-től 6893 m-ig 5 magassági lépcsőben hőmérsékletmérő műszereket helyeztünk el a regolitban (különböző mélység-tartományokban), de emellett megkezdődtek a geomorfológiai felmérések-elemzések is. 2014-ben lezajlott a műszerek első leolvasása, folytatódtak a helyszíni geomorfológiai vizsgálatok, további műszer-telepítések történtek (4600 m-en új állomás, 5300 m-en és 5950 m-en szélcsapdák elhelyezése), elemeztük a jégdegradációt, az olvadékvíz útját és a periglaciális jelenségek elhelyezkedését, megtaláltuk a Föld legmagasabb tömedencéjét (6500 m-en) és minden nedves közegből mintát vettünk az extremofil élőlények vizsgálatához.

A kutatómunka jelen fázisában – 2 éves adatsorok alapján – már ismerjük a vizsgált helyszínek olvadási és fagyási periódusainak hosszát, dinamikáját, a regolit aktív rétegének évi középhőmérsékleteit, az aktív réteg vastagságviszonyait, a gleccserdegradáció mai folyamatait. Magyarítani tudjuk a Föld legmagasabban fekvő tavainak keletkezését, mai helyzetét és kilátásaikat, valamint a periglaciális tömegmozgások alárendelt szerepének okait is. Az Ojos del Saladóra vonatkoztatott megállapítások ugyanakkor kiterjeszthetők: az Andok középső térségében 1500 km-nél is hosszabban húzódó Száraz-Andokban alapvetően hasonló magashegyi sivatagi állapotok jellemzőek.

## Helyszín

Az Andok legszárazabb része, a Puna de Atacama magasföld és az innen kiemelkedő 6000 méternél magasabb tűzhányók a Föld egyik legextrémebb környezetét alkotják. Itt található bolygónk legmagasabb vulkánja, a 6893 m-es Ojos del Salado (27°06'34,6"D, 68°32'32,1"Ny), amely a chilei-argentín határon rendkívül hideg és száraz (150 mm/évnél kevesebb csapadék, Messerli et al., 1997) területen jégsapka nélküli hegytömegként tornyosul. 6000 m körül gyakran előfordulnak –10 °C alatti nyári nappali hőmérsékletek, az 5000 m fölötti területen pedig eső egyáltalán nem jellemző, ám néhány órás havazás

nyáron is szinte minden héten várható – a hó gyors, teljes elszublimálásával. A hóviszonyokról, illetve a térség állandó, felszíni jegének előfordulásáról távérzékeléses elemzés készült (Gspurning et al., 2006), azonban az aktuális hóborítás gyakran igen rövid jelenléte miatt mind a csapadékadatok, mind az olvadékvíz-becslések bizonytalanok – nem beszélve a jégmaradványok, jégtípusok elkülönítéséről, degradációjának, fogyási folyamatainak meghatározásáról.

Földünkön itt húzódik legmagasabban az éghajlati hóhatár (7000 m körül, Clapperton, 1994), itt találunk legmagasabban – időszakos – tavakat (6000-6500 m között), ez bolygónk legmagasabban húzódó sivataga (kb. 6200 m-es magasságig). Az Ojos del Salado szunnyadó tűzhányó, fő működési ideje mintegy 30 ezer éve zajlott (Moreno és Gibbons, 2007), ma vulkáni kísérőjelenségek működnek rajta és környezetében néhány helyen.

## Módszerek, eszközök

Kutatásaink során terepbejárások, szelvényelemzések révén részletesen feltártuk az Ojos del Salado és környezetének geomorfológiai viszonyait, hiszen mérőhelyeink kijelöléséhez ez elengedhetetlenül szükséges volt. Mindehhez felhasználtuk a területről rendelkezésre álló, több időpontban készült, 1 m × 1 m-es terepi felbontású, a GoogleEarth szerveréről elérhető űrfelvételeket (2007. április 29., 2008. december 16., 2012. április 17.). A felszín alatti hőmérsékletmérés HOBO Pro v2 dataloggerekkel folyik. A 2012-es telepítés alapján:

-4200 m-en 10 cm és 35 cm mélyen

(itt végül – állatbolygatás miatt – kőzetfelszíni hőmérsékletet sikerült mérni),

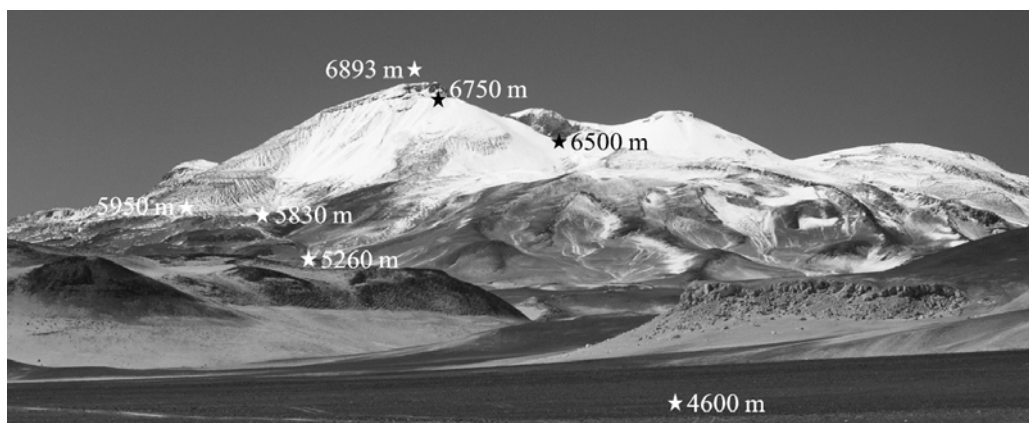
-5260 m-en 10 cm, 35 cm és 60 cm mélyen,

-5830 m-en 10 cm, 35 cm és 60 cm mélyen,

-6750 m-en 10 cm és 17 cm mélyen,

-6893 m-en a felszínen és 10 cm mélyen.

2014-ben 4600 m-en még egy állomást hoztunk létre (10 cm és 35 cm mélyen elhelyezett műszerekkel), valamint 5950 m-en, 2 m magasságban, árnyékolt helyen is elhelyeztünk egy adatgyűjtőt (1. ábra). A mérési gyakoriság óránkénti, vagyis a kétéves mérési periódusban egy műszerből kb. 18 ezer adat származik.



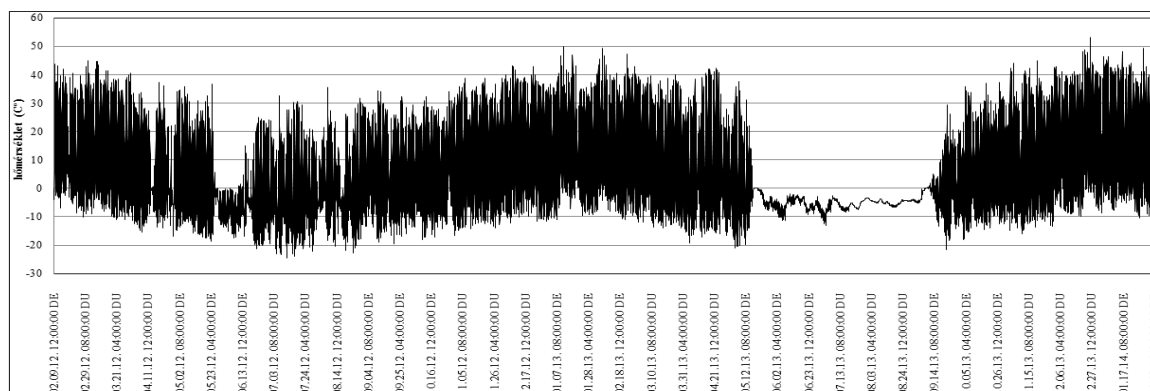
1. ábra: A legfontosabb vizsgálati helyszínek az Ojos del Saladón

Az eolikus alakzatokat, ill. anyagukat űrfelvétel alapú képfeldolgozással, helyi szelvénykészítéssel, mintagyűjtéssel és laboratóriumi sűrűségméréssel vizsgáltuk. A nagyszemcsés hordalékszállítás vizsgálatához három szélcsapdát állítottunk föl 5300 m-en és 5950 m-en. A hó-firn-jég elkülönítésre terepi precíziós mérleget és Eijkelkamp mintavevőket használtunk. A regolit porozitásának, vízszállításának megállapítására fémcsőmintákat vettünk.

## Eredmények

**Kőzetfelszíni hőingás.** Az Ojos del Saladón mintegy 6200 m-es magasságig sivatagi környezetet találunk. Ennek leggyakoribb felszín-típusai a kősvatagos és a homokleplek, illetve hullámfodrokkal borított területek (6000 m körül a szélerezési terek jutnak uralomra).

Az igen erőteljes hőingás és rendkívüli fagyváltozékonyság okozta aprózódás mindent betemető törmelék képződéséhez vezet. A 4200 m-es adatgyűjtő helyünkön az egyik műszer két éven keresztül kősvatag-felszíni hőmérsékletet mért – közvetlen besugárzás alatt (2. ábra). Ebből megállapítható, hogy hóborítás nélkül kb. 330–340 nap is fagyváltozékonny lehet a felszínen. A szélsőséges napi ingás eltűnése jelezte hóborítás viszont szélsőségesen alakul, mivel az első évben összesen mintegy 3–4 heti volt, míg a második évben összidőtartama elérte a 4 hónapot, a napi hőingás-érték pedig az 50 °C-t is meghaladta (télen is, amikor nappal akár 30 °C fölé melegedett a felszín, majd éjszaka –20 °C-ig is hűlhetett).



2. ábra: Kőzetfelszíni hőmérsékletváltozás (2012.02.09. – 2014.02.07.) 4200 m-en

**Gleccsermaradványok.** Az Ojos del Salado felszíni jégborítása napjainkra néhány apró, 100 méteres nagyságrendű holtjégfoltra zsugorodott (3. ábra).

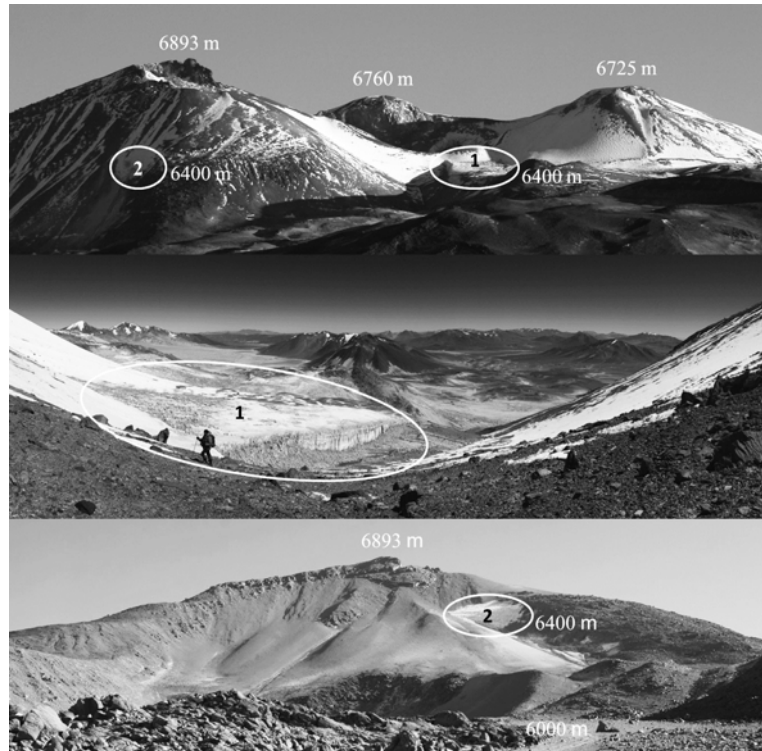
A hegyen kialakult egykori gleccserek maradványjege azonban törmelék alá temetve, lejtőtörmelékkel fedve és jégmagvú oldalmoréna-sáncok formájában (5000 m és 6300 m között) a felszíni megjelenésénél nagyobb mértékben is jelen van ma még. A gleccserjég fogyását e száraz területen a törmelékkel való betemetődés – szigetelő jellegénél fogva – jelentősen késlelteti, ám napjainkban pont ezen eltemetett jég olvadása az egyik legdominánsabb folyamat.

Az olvadás akkor gyorsul fel, amikor az eltemetett jégtömb a felszínre kerül: ez akkor valósul meg, ha az olvadákvizek (melyek szerepe ma egyre nő a növekvő olvadás miatt) bevágódnak a völgytalpon, alámoszák a völgyoldalakat és a jeget fedő homok, vagy épp horzsakő lecsúszik. E folyamat viszonylag rövid idő alatt megváltoztatja a völgy morfológiáját. A holtjég-tömb olvadása ugyanakkor megindulhat az elvékonyodó homokréteg alatt is, aminek az lesz a felszíni következménye, hogy a homok tömörödik, kerekded, sekély mélyedések, a fedett karsztok szuffúziós, utánsüllyedésszerű töbreihez hasonló alakzatok jönnek létre.

**Cementjég-olvadás.** A felszíni és az eltemetett gleccserjég olvadásából származó víz mellett ma a permafroszt aktív rétegéből származó olvadákvíz is rendkívül jelentős. Ez az alapvetően szivárgó nedvesség a zárt mélyedésekben a felszínre kerül, így (sekély vizű) magashegyi tavak képződnek. A tavak túlfolyásából viszont már patakok indulhatnak.

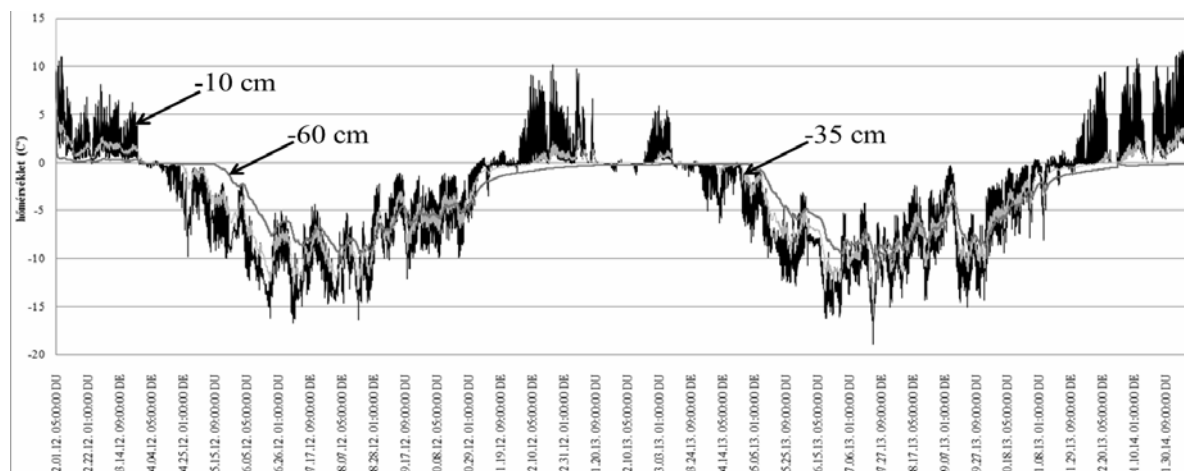
A permafroszt olvadása, a jéggel rendelkező övezet magasabbra tolódása akkor vizsgálható, ha adataink vannak az aktív réteg hőmérsékletjárásáról, illetve a H<sub>2</sub>O halmazállapotváltozásairól. A geomorfológiailag legjellegzetesebb, reprezentatív magassági szinteken

elhelyezett mérőállomásaink ezt a célt szolgálják. Így meghatározhattuk, hogy az Ojos del Salado csúcsán a 10 cm-nyi vastagságú törmelékben mért évi középhőmérséklet (8 cm-rel a felszín alatt)  $-17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  és a vizsgált 730 naphól mindössze 18 napon fordult elő kevéssel fagypont fölötti hőmérséklet, 97 napon azonban  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  alá ment a regolit hőmérséklete. A gyakorlatilag állandóan fagyott közettörmelék ugyanakkor teljesen száraz, így laza, morzsolódó állagú.



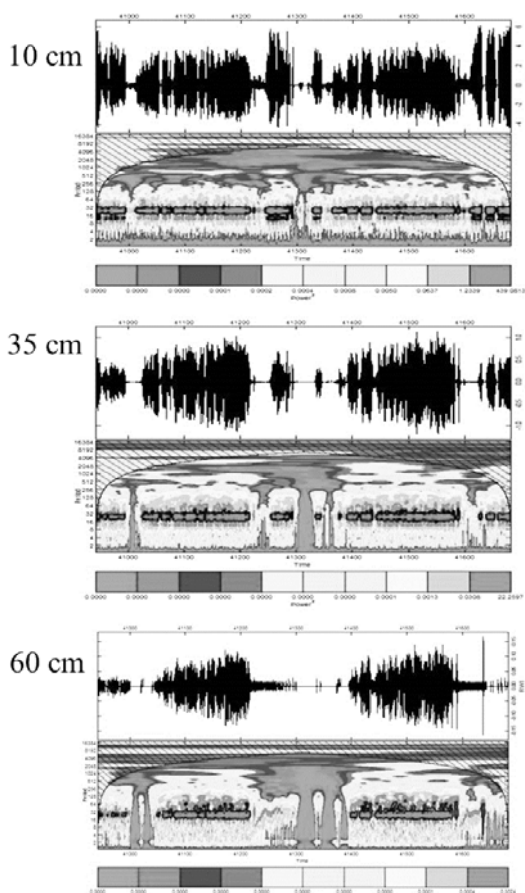
3. ábra: Gleccsermaradványok, holtjégfoltok az Ojos del Saladón

Az alacsonyabb magassági tartományokban végzett mérések azonban kiválóan mutatják az aktív réteg hőmérsékletjárásán keresztül a fagyás-olvasás ciklusait, ami legfőképp a halmazállapot-változások időszakainak meghatározása és az aktív réteg megvastagodásának nyomon követése szempontjából lényeges (4. ábra)



4. ábra: Az 5830 m-en létesített állomás aktív rétegében (10 cm, 35 cm és 60 cm mélyen) mért hőmérsékletek (2012.02.01. – 2014.02.14.)

Az 5800-6000 m körül 60 cm-es mélységig megvastagodó aktív réteg fagyási-olvadási ciklusairól a napi periodicitás-elemzés nyújt képet (5. ábra). A periódusok eltűnése a nagy energiát felemésztő halmazállapot-változások sajátossága. Míg a téli időszakokban a teljesen átfagyó aljzatban végig tapasztalható a napi hőmérsékleti ciklikusság, az olvadási időszakban mindez megszakad. Ennek különlegessége, hogy a kiszáradó felszínközeli részek miatt a felső rétegek nyári újrafagyása – az alacsony külső hőmérsékletek ellenére is – viszonylag ritka jelenség. Ugyanakkor az aktív réteg alsó része felé haladva – a magasabb nedvességtartalom miatt – gyakrabban történik halmazállapot változás, 60 cm mélyen gyakorlatilag a nyári szezonban a víz-jég határán váltakozik a kőzetszemcsék közötti nedvességtartalom. Az aktív réteg ebben a magasságban 8 hónapon át (áprilistól decemberig) fagyott állapotú, évi középhőmérséklete – mélységtől függően –  $-3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  közötti. Az olvadási időszakot 4–5 igen hideg szakasz tagolja, ekkor a felső rétegek időleges újrafagyása is megindul. Huzamosabb, vastagabb nyári hótakaró jelenlétére nem utalnak az adatok.



5. ábra: Az 5830 m-en fekvő állomás aktív rétegében (10 cm, 35 cm és 60 cm mélyen) mért hőmérsékletjárás periodicitása (a periodicitás meglétét minden mélységnél az alsó diagramrészek központi, vastag sávja jelzi)

E magassági tartománynak – a cementjég viszonylag hosszú, ám elnyúló olvadási szakasza és jelentős felolvadási mélysége miatt – igen jelentős szerepe van az alacsonyabb szintek vízellátásában: a legfontosabb felszín alatti vízforrásnak tekinthető.

### Következtetések

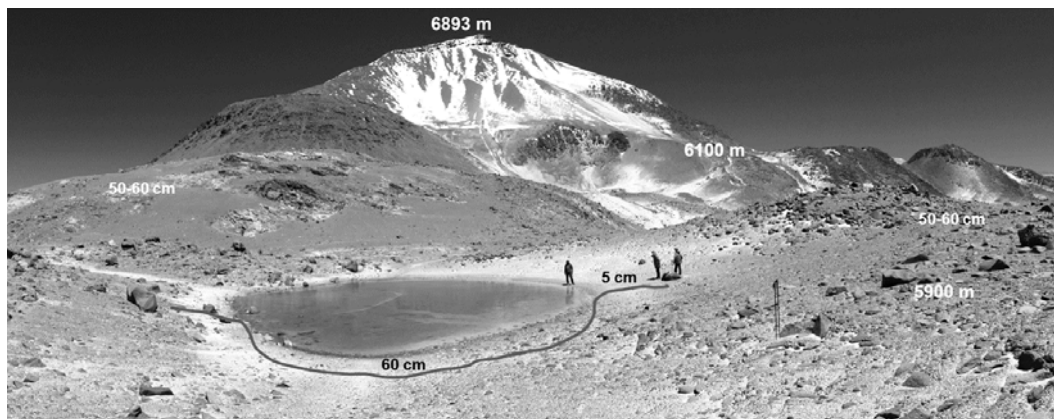
A szunnyadó óriásvulkán jégtartalma – mint aktív vízbázis – jelentős átalakuláson megy keresztül, s e száraz területen a jégolvadás alapvetően meghatározza a felszínfejlődést.

Az eolikus folyamatok hordalékszállítását ott a legerőteljesebb, ahol a felszíni rétegek hosszú időszakokra engednek föl és száradnak ki, nyári újrafagyásuk pedig nem jellemző. Az 5300 m körüli szintben az aktív réteg évi középhőmérséklete  $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $-0,48\text{ }^{\circ}\text{C}$  közötti, fél éves, gyors ütemű felolvadással és aktív réteg mélyüléssel. A felszíni, felengedő és száraz üledéket könnyen megmozgatják a jellemzően igen erős, nyaranta méréseink szerint napi gyakorisággal 40–50 km/h-s szelek.

A jég- és firnmaradványokat már betakart homoktelepek aktív nyári mozgásban vannak, de az oladási folyamatok ma jelentősen átalakítják felszínüket – a jégre települt morénaanyagokkal együtt. Szuffóziós alakzatok, oladásformák és oladákvíz-erodálta felszínek jönnek létre, éves skálán is kirajzolódó sebességgel. Az eltemetett jég mai degradációja azért is különösen figyelemre méltó, mert az oladákvíz mennyiségének növekedése figyelhető meg, hiszen a jégolvadás rövidtávon növeli a felszíni és felszín alatti vízáramlás mennyiségét.

Az oladákvíz legfontosabb forrásterülete az 5800–6000 m-es övezet: az aktív réteg felengedése elnyújtott folyamat, a jégcement olvadása egész nyáron szivárgó nedvességgel táplálja a lejtők felengedő regolitrétegének alját. Ebben a magasságban az aktív réteg megvastagodása jellemzően 50–60 cm-es mélységig terjed, a szivárgó víz a medence-területeken tavakat hoz létre (6. ábra), s az erős besugárzás hatására e sekély (1 m-nél ritkán mélyebb) állóvizek nyáron akár  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra is felmelegedhetnek (miközben a levegő nappali hőmérséklete árnyékban itt ugyanekkor fagyponthoz közeli). A tavak hűtőhatása tovább csökkenti alatta a permafroszt mennyiségét, jelentős méretű talikokat létrehozva.

A besugárzás növekedésével, a felszín erőteljesebb felmelegedésével az aktív réteg további vastagodása, végül a permafroszt degradációja következik be. Ez nyaranta egyelőre növekvő lefolyást okoz, de az örökfagy felszakadozásával, az övezet magasabbra szorulásával és zsugorodásával néhány évtizedes távlatban a hegyi környezet teljes kiszáradását okozhatja.



6. ábra: Permafroszt eredetű oladákvízből táplálkozó tó 5900 m-en az aktív réteg maximális nyári vastagságával

## Hivatkozások

- Clapperton C.M., 1994: The Quaternary glaciation of Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 67, 369-383.
- Gspurning, J., Lazer, R., Sulzer, W., 2006: Regional climate and snow/glacier distribution in Southern Upper Atacama (Ojos del Salado) – an integrated statistical, GIS and RS based approach. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, 41, 59-70.
- Messerli, B., Grosjean, M., Vuille, M., 1997: Water availability, protected areas, and natural resources in the Andean desert Altipano. *Mountain Research and Development*, 17, 3, 229-238.
- Moreno, T., Gibbons, W., 2007: The Geology of Chile. Geological Society of London, 414.