

LAVAKÁK HÁROMDIMENZIÓS MODELLEZÉSE FOTOGRAMMETRIAI ELJÁRÁSSAL

TDK dolgozat

Készítette:

Raveloson Andrea

ELTE-TTK környezettudomány szakos hallgató

Témavezető:

Molnár Gábor

ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék
Tudományos munkatárs



Budapest
2011.

1. Tartalomjegyzék

1. Tartalomjegyzék.....	1
2. Bevezetés.....	2
3. Madagaszkárról röviden.....	3
4. Lavaka	4
4.1. A lavakák keletkezéséről és fejlődéséről alkotott vélemények	5
4.2. A lavakák csoportosítása	7
5. Fotogrammetria	9
5.1. A fotogrammetria alapjai	9
5.2. Digitális fotogrammetria	12
5.3. A 3D modellező programok	13
5.3.1. Hagyományos szoftverek	14
5.3.2. Internetes programok.....	15
5.3.3. Bővítmények	15
6. Módszertan	16
6.1. A terepi mérés menete és eszközei.....	16
6.1.1. A terület bemutatása.....	16
6.1.2. A mérés során használt eszközök.....	17
6.1.3. A mérés menete	17
6.2. A modell kivitelezése	20
6.2.1. A 3D modellező programok bemutatása	20
6.2.2. A félautomata modell megalkotása	23
7. Eredmények.....	26
7.1. A modellező programok eredményei a lejtőlábi lavakára.....	26
7.1.1. PhotoScan.....	26
7.1.2. Hypr3D.....	28
7.1.3. Photosynth.....	29
7.1.4. Arc3D.....	30
7.2. A modellező programok eredményei a lejtőközépi lavakára	31
7.2.1. PhotoScan.....	31
7.2.2. Hypr3D.....	32
7.2.3. A „házi” modell eredményei	32
8. Eredmények diszkussziója	36
9. Köszönetnyilvánítás	38
10. Irodalomjegyzék.....	39

2. Bevezetés

A kőzetek és talajok eróziója világszerte komoly problémákat okoz. Tájképformáló hatásuk révén jelentős hatást gyakorolnak, mind a természetes mind az emberi környezetre. Az eróziónak számos formája ismert, s ezeknek a megértése egyre inkább előtérbe kerül a földtudományok területén.

Dolgozatomban egy Madagaszkáron található eróziós jelenségről, a „lavaká”-ról írok. A lavakák keletkezési és fejlődési mechanizmusa, már több évtized óta vita tárgyát képezi. Jelentőségüket mutatja, hogy ennek a felszínformának „köszönheti” Madagaszkár, hogy az eróziós ráta tekintetében világviszonylatban első helyen áll. A tájképromboló hatás mellett a lavakák komoly jelentőséggel bírnak az ország mezőgazdasági viszonyaira, rombolják az utakat és házakat „nyelnek el”.

Ahhoz, hogy megelőzzük a lavakák keletkezését, elengedhetetlen kialakulásuknak és fejlődési mechanizmusuknak megértése. Erre tettem én is kísérletet különböző geomorfológiai és kőzettani vizsgálatok elvégzésével. Jelen dolgozatban az általam fényképekkel felmért lavakákról kísérek meg térmodellt alkotni, ehhez pedig különböző 3D-modellező programok alkalmazhatóságát vizsgálom. Előzetes elvárásom az, hogy a kapott térmodell alkalmas legyen további – főként geomorfológiai – vizsgálatok elvégzésére.

A vizsgálat során kategorizáltam az alkalmazott programokat aszerint, hogy fizetős/ingyenes, automata/félautomata/manuális, illetve, hogy légi vagy földi felvételek feldolgozására alkalmasak-e. Céлом a tesztelés során annak felderítése volt, mely program lenne a legmegfelelőbb az általam készített fotók alapján a vizsgált lavakák háromdimenziós (3D) modelljének előállítására.

A fentiek mellett kísérletet tettem a képek manuális illesztési pontok alkalmazásával történő fotogrammetriai modellezésére is, egy a témavezetőm által kidolgozott MATLAB forrásnyelvű, az illesztést kiegyenlítő számítások segítségével végző programmal.

3. Madagaszkárról röviden

Madagaszkár a világ negyedik legnagyobb szigete Az Indiai-óceánon található Dél-Afrika partjaitól körülbelül 400 km-re keletre. Területe 587.045 km², azaz nagyjából 5-ször akkora, mint Magyarország. Éghajlata és domborzata igen változatos, melynek – és a kontinensektől elkülönülő sziget-jellegnek – köszönhetően teljesen egyedi biodiverzitás alakult ki a szigeten. A növény és állatfajok közel 80%-a endemikus, azaz sehol máshol nem található meg a Földön. A 21 milliós lakosság nagy része a felföldeken, mezőgazdaságból és állattartásból él. Fő táplálékforrásuk a rizs. A sziget ásványkincsekben (grafit, króm, bauxit, vasérc, kvarc, drágakövek, stb.) gazdag, főbb energiaforrása pedig a víz (*Forum, 2009*).

A szigetet *Ashwall és Tucker (1999)* szerint 3 fő geológiai egység alkotja:

- Az ország kétharmadán prekambriumi kristályos alapkőzet található, mely idővel felgyűrődött és metamorfizálódott. Ezt elsősorban gneisz, pala és migmatit alkotja, melyet helyel-közzel prekambriumi bazalt és riolit kiömlési kőzetek is színesítenek.
- A nyugati sávon üledékes kőzetek található, mely a tenger által többször elöntött 2 nagy medencében (Boina- és Menabe-medencék) a legkarakterisztikusabb.
- Elszórtan a kainozoikumi vulkánizmus maradványai is megtalálhatóak.

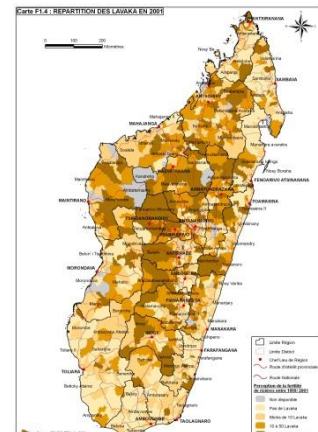
Erózió szempontjából Madagaszkár a világ legérintettebb területei közé tartozik (*Gaudie és Boardman, 2010*). A nemzetközi segély- és fejlesztési szervezetek szerint a szigetnek van a világon a legmagasabb eróziós rátája. Ez elsősorban a lavakáknak köszönhető, mivel ezen eróziós formák óriási tömeget képesek megmozdítani. Egy lavaka úrtartalma több százezer m³ lehet és négyzetkilométerenként akár 30 darabot is találhatunk ezekből a képződményekből (*Wells és Andriamihaja, 1993*).

4. Lavaka

A lavaka malgasul, azaz a helyi nyelven annyit jelent, hogy lyuk. A sziget lakói ezt használják mindenféle lyukak megnevezésére, legyen szó egy 2 cm-es mélyedésről vagy több tíz méter átmérőjű gödrökről.

A nemzetközi szakzsargonban azonban a lavaka egy különleges eróziós formát jelöl, mely ugyan máshol is előfordul a Földön (például Brazíliában, ahol „voco-rocas”-nak nevezik), de sehol sem található meg olyan mennyiségben, mint Madagaszkáron (1. ábra).

A lavakákat a szakirodalom „gully erosion”-ként, azaz árkos erózióként tartja számon (Riquier, 1954; Andriamampianina, 2006; Cox et al., 2009 és 2010; Zavada et al., 2009), habár több mindenben is komoly eltérések mutatkoznak köztük és a valódi „gully”-k között. Nem jellemzik például őket, felszíni vízfolyások, illetve alakjuk és méretük is merőben eltérő lehet a hagyományos vízmosásformákhoz képest (Wells és Andriamihaja, 1993; Cox et al., 2010). Ezt mutatja a 2. ábrán látható összetett lavaka is.



1. ábra: a lavakák gyakoriságát jelző térkép, minél sötétebb a terület annál több lavaka tartkítja Forrás: ONE, 2011



2. ábra: Egy tipikus lavaka, a malgas fennsíkon (a kép jobb sarkában látható 4 méter széles faépítmény mutatja, milyen méretes). Készítette: Raveloson, 2011

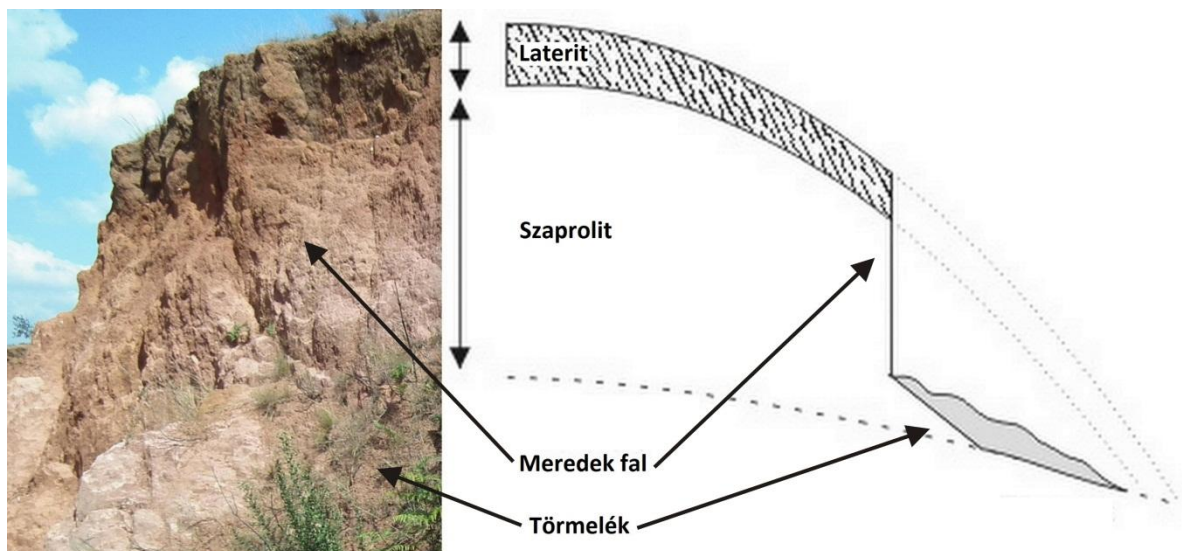
Leggyakrabban amfiteátrumszerű, ovális alaprajzú katlanokról van szó, melyeket függőleges oldalfalak, lapos aljzat és a katlan alsó részén elhelyezkedő szűk kijárat jellemez.

A lavaka fejlődése a falak függőleges beszakadásával történik. A szomszédos lavakák idővel egybeszakadhatnak és a katlanok bonyolult, fűrtös rendszere alakul ki. Egy ilyen összetett lavaka úrtartalma meghaladhatja az 500.000 m³-t is (Balázs, 1983; Wells és Andriamihaja, 1993; Andriamampianina, 2006). Nem csoda tehát, hogy igen komoly környezeti hatásokkal járhatnak. Ilyen például a folyók és tavak eliszaposodása a hordalék hatására, mezőgazdasági területek elöntése, utak, csatornák, épületek beszakadása.

4.1. A lavakák keletkezéséről és fejlődéséről alkotott vélemények

A lavakák keletkezésének és fejlődésének okai még nem igazán tisztázódtak. Különböző tényezőket szoktak felsorolni, melyek valamilyen szinten mind befolyásolják az erózió mértékét. Az már bizonyos, hogy ezen tényezők közül az éghajlati viszonyok és a terület geológiája döntő szerepet játszanak. Az azonban, hogy az antropogén hatások, a növénytakaró hiánya, a terület tektonikája és a víz földalatti mozgása mekkora szerepet játszanak a lavakák keletkezésében és fejlődésében, egyelőre nem ismert.

A legelfogadottabb forgatókönyv szerint a lavakák keletkezésének alapfeltétele egy több 10 m vastag szaprolit¹, mely egy vékony, de jóval állékonyabb laterit² alatt helyezkedik el (Riquier 1954, Razanatseho et al., 2010). Ezeknek a talajszinteknek a térbeli elhelyezkedése a 3. ábrán látható.

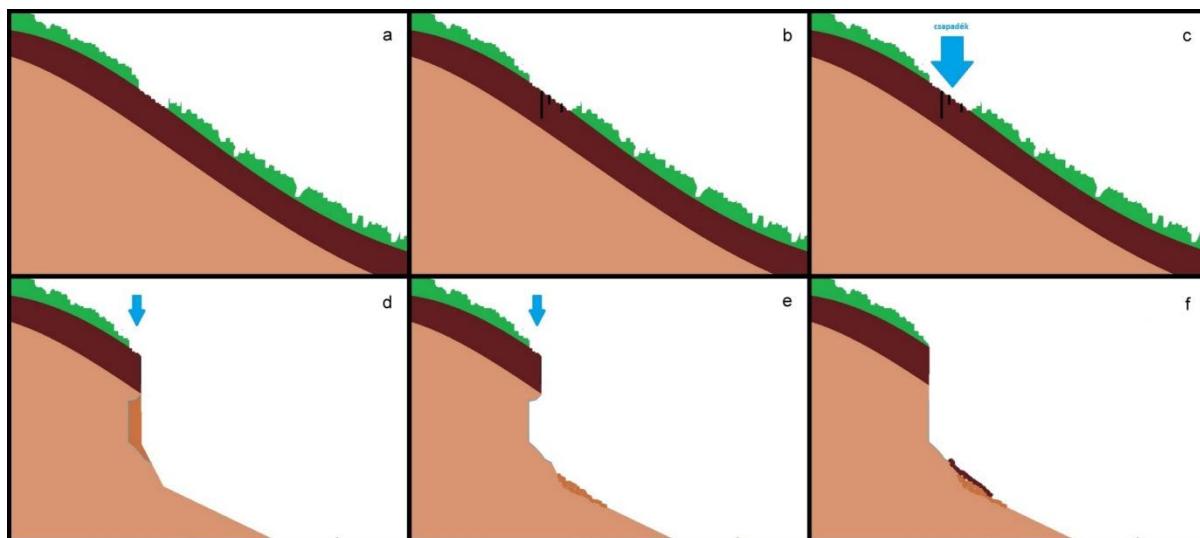


3. ábra: A lavaka falai és főbb jellegzetességei szemből és oldalnézetből. A felső barnászörös laterit védi az alatta lévő világos vörös szaprolit szintet. Ha azonban a víz átjut a lateriten, nagyon gyorsan kialakulnak a lavakákra annyira jellemző szinte függőleges falak. Készítette: Raveloson, 2011

¹ kilúgzott, mállott talaj

² erősen mállott trópusi talaj

A kialakulás másik alapfeltétele a trópusi monszun jellegű éghajlat szezonális, ami a száraz időszakban repedések keletkezéséhez vezethet a talaj felső szintjében. Az esős évszakban ezeken a repedéseken keresztül folyik be a víz. A mélybe szivárgó és koncentrálódó víz kioldja a szapolit lazább szerkezetű részeit, melyek ennek hatására megindulnak. Rövid időn belül beszakadoznak az oldalfalak és egy nagyon gyors lavakizáció³ zajlik le (4. ábra; Balázs, 1983; Razanantseho et al., 2010).



4. ábra: A lavák keletkezésének és fejlődésének sematikus ábrája. A vörös réteg jelöli a vékony lateritet, a barackszínű réteg pedig a több 10 méteres szapolit szintet. Kékkel jelöltem a lavaka keletkezését okozó egyik fő tényezőt, a csapadékot. Készítette: Raveloson, 2011

Mások a terület hidrológiai és hidrogeológiai adottságaival magyarázzák a lavák keletkezését. Előfeltételként itt is az éghajlat szezonálisát és a mállott talaj szerteágazó szokat említik, de *Andriamampianina (1985)* szerint a keletkezés oka a rétegek hidraulikus vezetőképességének eltérésében rejlik. Esős évszakban ugyanis a víz bentreked a szapolites szintben és a megnövekedett talajvíz hatására hidrosztatikus túlnyomás keletkezik.

A lavák nagy része meredek (leggyakrabban 15-20° közötti) lejtőkön képződik, 1000 m feletti hegyoldalakon. (*Cox et al., 2003 és 2004; Bakoariniaina et al., 2006*). Az antropogén hatásokat illetően a *Wells és Andriamihaja (1993)* által végzett kutatások egyértelműen cáfolják, hogy a lavák teljes mértékben emberi hatásra keletkeznének. Az általuk vizsgált lavák csak 25%-a volt emberi hatáshoz köthető.

Fejlődési stádiumok: Az irodalom nagy része 3 (*Riquier, 1954; Rasaminana et al., 2007*) illetve 5 fázist (*Well and Andriamihaja 1991, 1993*) különböztet meg a lavák fejlődésében : *3 fázisú modell*

1. Keletkező lavaka: kis mélyedések, repedések

³ a lavaka kialakulásának folyamata

2. Aktívan fejlődő lavaka: gyors anyag elszállítódás és meredek falak
3. Stabil (inaktív) lavaka: falai lankásabbak és megtelepedtek rajta a növények

5 fázisú modell

5 fázis esetén a keletkező és aktív lavakákat további 2-2 csoportra szokták bontani.

1. Kezdeti foltok a hegyoldalban („raw patches on hillside”),
2. Mély, kopár bevágódások és aktívan erodálódó függőleges falak
3. Kezdeti feltöltődés
4. V-alakú lavaka, betemetődött, vagy benőtt falakkal.
5. Teljesen stabil, U-alakú végső forma.

Nem minden lavaka megy keresztül mind az 5 fázison, különböző komplex külső hatásokra egyes fázisok kieshetnek (Wells and Andriamihaja, 1993).

4.2. A lavakák csoportosítása

A lavakák csoportosítása történhet a *fejlődésük, kifejlődési stádiumuk* alapján. Az előző pontban említett kategóriák alapján dolgozatomban az alábbi fejlődési stádiumokat különítem el melyek közül az első 4 fázis látható az 5. ábrán:

1. Kezdeti foltok a domboldalon
2. Mélyebb bevágódások, a lavakizáció hirtelen megindulása
3. Mély, kopár lavaka, gyors fejlődéssel és meredek falakkal
4. Növényzettel félig meddig benőtt, stabilizálódó félben lévő lavaka
5. Teljesen stabil, inaktív lavaka



5. ábra: A lavakák fejlődésének első 4 fázisa. Készítette: Raveloson, 2011

A lavakákat megkülönböztethetjük *formájuk* alapján is. Ennek megfelelően vannak egyszerű és összetett lavakák. Ezeken belül leggyakrabban a körte, amfiteátrum, szív, és legyező alakokat szokták megemlíteni. (A kialakuló forma elsősorban a kőzet tulajdonságaitól függ.)

Találkozhatunk a lavakák *kor szerinti csoportosításával*, mely szerint léteznek ősi és jelenkori lavakák. Az ősi lavakák a negyedidőszakban lezajló klímaváltozás hatására keletkeztek, és korukat 20.000 – 25.000 évre becsülik (Andriamampianina, 1985).

A leggyakoribb csoportosítás, a *keletkezés helye szerint* történik (Wells et al., 1991). Ez alapján megkülönböztethetünk „lejtőlábi”, „lejtőközépi”, és „völgyképző” lavakákat.

A völgyképző lavakák extrém példái a hátravágódó erózió széles völgyé alakulásának és olyan ritkán fordulnak elő, hogy ezeket a továbbiakban nem tárgyalom. A lejtőlábi és lejtőközépi lavakák alapvető tulajdonságait az 1. táblázat foglalja össze.

Lejtőközépi lavakák	Lejtőlábi lavakák
 Egyszerűek, erősen szimmetrikus ovális alakot vesznek fel, és elnevezésük onnan származik, hogy a lejtők közepén alakulnak ki. Növekedés közben továbbterjednek fölfelé és lefelé a hegyoldalon, miközben szív vagy fordított körte alakot vesznek fel. Jellemzi őket, hogy az aktív lavaka falai nagyon meredek és mélyek. A lavakák több mint 80%-a ebbe a kategóriába sorolható.	 A hegylábánál keletkeznek, és a lejtő mentén fölfelé nővekednek. Aszimmetrikusak és harapás-nyomszerű mintázattal jellemezhetők. Falaik meredek, de az átlagos lavakákkal szemben jóval szélesebb „kijáratuk” (outflow) van. A lejtőközépi lavakákkal szemben rövidek de akár több 100 m szélesek is lehetnek.
	

1. táblázat: A lejtőközépi és lejtőlábi lavakák összehasonlítása és bemutatása képekkel. Forrás: Wells et al. 1991, képeket készítette: Raveloson, 2011

5. Fotogrammetria

„Művészet, tudomány és technológia, melynek segítségével fizikai objektumokról, tárgyakról, a környezetről megbízható információk nyerhetők hagyományos fénykép-, műhold-, és egyéb felvételek készítése, mérése és interpretálása által.”

(ASPRS, 1980; in: Szatmári 2002)

5.1. A fotogrammetria alapjai

A fotogrammetria tudománya a földfelszín, illetve a rajta található objektumok helyzetének és alakjának fényképek alapján történő nagy pontosságú meghatározásával foglalkozik. Segítségével a méretek meghatározása a fényképek utólagos kiértékelésével történik (Metricon, 2011). A hagyományos képeknek magas a geometriai torzulások által okozott „hibája”⁴. A fotogrammetria ezen torzulásokat szűri ki *kollinearitási egyenletek* alkalmazásával. Ezek segítségével, ortogonális vetítéssel egy olyan képet állítunk elő, mely a lefényképezett tárgy torzulásmentes képét adja vissza (Metricon, 2011).

A módszer a nagyon gyors terepi munkát és tömeges adatnyerést igénylő feladatok, illetve nehezen megközelíthető területek esetében különösen hatékony. Az általa nyújtott metrikus képi háttér-információk (ortofotó, fotó realisztikus modell) pedig rengeteg többletinformációt tartalmaznak, valamint szemléletesebbé teszik az adott terület, objektum ábrázolását (Metricon, 2011).

Történelmi kitekintés

A fotogrammetria alapjai egészen Leonardo Davinci-ig nyúlnak vissza, de az első valódi alkalmazása az 1850-es évek környékére tehető, amikor Aimé Laussedat (akit a fotogrammetria atyaként is szoktak emlegetni) földi felvételek segítségével hozott létre topográfiai térképet. Az első világháborúnak köszönhetően a fotogrammetria alkalmazása gyorsan elterjedt, és már repülőgépről készült felvételeket is használtak ortofotók előállítására. A kezdeti időkben csak topográfiai és építészeti célokra alkalmazták ezt a módszert, de a benne rejlő lehetőségeket hamar felismerték más tudományágakban is. A fotogrammetria Laussedat óta rengeteget fejlődött és ma már a legszigorúbb mérnöki követelményeknek is megfelel, így például akár hidak deformáció vizsgálatára is alkalmasak az ezzel a módszerrel előállított térmodellek (Burtch, 2011; Metricon, 2011).

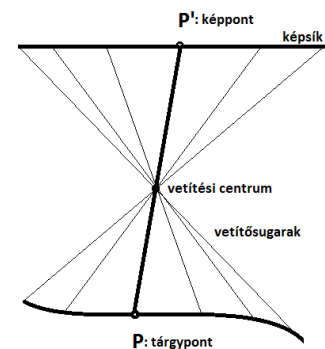
⁴ A szó szoros értelmében nem hibáról van szó, csak a vetítési eljárások különböző geometriai törvényszerűségeiből adódó eltérésekről

A fotogrammetriai kiértékelés

A fotogrammetriai kiértékelés a centrális vetítéssel készített felvételek közötti perspektivikus leképezéssel, sztereoszkópián alapul. A sztereoszkópia lényege, hogy az egyes objektumok a különböző állásokból készített képeken másképp képeződnek le, így az eltérő leképeződések (parallaxisok) mérésével számíthatók a térbeli koordináták. Ennek során a több fényképfelvételen azonosítható pontok segítségével előállítható az adott felszín vagy objektum 3D modellje, fototérképe és egyéb termékei (pl. helyszínrajz) (Mettricon, 2011).

A képkészítés feltétele a fotogrammetria szempontjából, hogy éles képet készítsünk lehetőleg nagy látószöggel és megfelelő megvilágítással.

A fényképek maguk centrális vetítéssel készülnek. (Centrális vetítésnek nevezzük, amikor a tárgy képét a vetítési síkon a tér egy kitüntetett pontján –a vetítési centrumon– keresztülhaladó vetítősugarak segítségével állítjuk elő. A vetítő centrum és a tárgy pontjaira illeszkedő vetítősugarak összessége a sugárnyaláb) (Mélykúti, 2004).



A képkészítés történhet mérőkamerával, részben mérőkamerával, illetve hagyományos fényképezőgéppel, azaz „nem mérő kamerával”. A „nem mérő kamerák” fotogrammetriai célokra csak kis pontossági követelmények mellett és nagyobb kiértékelő munkával alkalmazhatók (Mélykúti, 2004).

A leképezés a légi fényképező repülés alatt, vagy a földi állásból készített fényképfelvételek készítésével valósul meg. Ugyannak a tárgynak a képe azonban másként jelenik meg a centrális vetítéssel készült fénykép síkján, mint az ortogonális vetítéssel készült térkép síkján. Cél tehát a tárgy centrális vetítéssel készített fényképéből előállítani a tárgy ortogonális vetítéssel előálló, torzulásmentes, tónusos képét, egy alkalmasan választott vetítési síkon (Mélykúti, 2004).

Csoportosítás

A fotogrammetriai módszerek csoportosítása leggyakrabban a feldolgozandó képanyag és a kiértékelő eszközök szerint történik.

A fényképfelvételek készülhetnek a levegőből (repülőről, műholdról) és a földfelszínről. Ez alapján megkülönböztethetünk ún. *légi- és közelfotogrammetriát*.

A kiértékelő eszközök, illetve a fotogrammetria fejlődési fázisai alapján az alábbi csoportosítás lehetséges (Burtch, 2011; Czímber, 2001; Mélykúti, 2004):

1. „Mérőasztalos” fotogrammetria
2. *Analóg fotogrammetria*: az analóg képek kiértékelése optikai-mechanikai elven működő analóg műszerekkel (például: Wild A7, A8 vagy BandS) történik, a helyszínrajzok pedig a műszerhez mechanikusan hozzákapcsolt rajzeszköz segítségével készülnek.
3. *Analitikus fotogrammetria*: az analóg képek kiértékelése számítógéppel vezérelt analitikus műszerekkel, leggyakrabban analitikus plotterekkel (például Alfa2000, Wild BC) történik. A kiértékelés eredménye itt már egy digitális állomány, amely tetszőleges CAD⁵ szoftverrel feldolgozható.
4. *Digitális fotogrammetria*: a digitális (vagy digitalizált) képanyag kiértékelése digitális módon leggyakrabban digitális mérőállomásokkal (például *Integraph Image Station*, *Z/I Imaging ImageStation 2001*) történik.

Hasznosítás

A fotogrammetriát ma már a tudomány nagyon sok területén alkalmazzák sikeresen. Így például használják a meteorológiában tornádók szélsősebességének mérésére; régészeti lelőhelyek gyors feltérképezésére illetve a feltárások dokumentálására; az építészetben hidak, épületek vizsgálatára és felmérésére, vagy épp a geológiában és földrajzban térképek készítésére. Fontos szerepe van az egyes technológiai eljárásoknál, ahol többek között a minőség ellenőrzésére használják. Egyre gyakrabban kerül elő filmek, videojátékok és weboldalak készítésénél is. Egyes országokban divattá vált az épületek 3D-s bemutatása, melynek során a weboldalra látogató virtuális sétát tehet például Párizs nevezetesebb épületeibe.

A fotogrammetria termékei a tárgypont térbeli koordinátáinak meghatározása, a digitális ortofotó (geometriai torzulásoktól mentes kép, melyre nagyon jó példát mutat a „Google Maps”), illetve a tárgy vonalas vetületi rajzának előállítása a térképezés síkján (melyből különböző topográfiai térképek készíthetők) (Mélykúti, 2004; Metricon, 2011).

⁵ Computer Aided Design (számítógéppel segített tervezés) szoftverek a 2D vektor-grafika alkalmazásán rajzoló rendszerektől a 3D parametrikus felület- és szilárdtest modellező rendszerekig a megoldások széles skáláját kínálják.

5.2. Digitális fotogrammetria

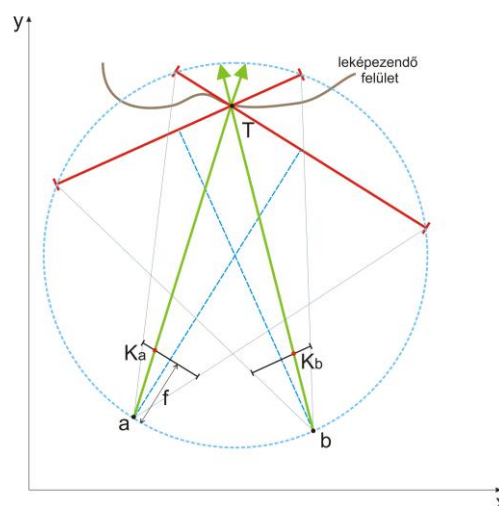
A digitális fotogrammetria olyan számítástechnikai eszközökkel vértézi fel a hagyományos fotogrammetriai eljárásokat, amely a feldolgozható anyag mennyiségét és a kapott adatok minőségét is nagyságrendileg növelheti (Czímber, 2001).

A digitális fotogrammetriában a hagyományos mérést a képmátrix egyes pixeleinek azonosítása váltja föl (Mélykúti, 2004). A digitális képek kiértékelése általában speciális, sztereo látást biztosító hardvereszközökkel, és nagyon sok funkciót automatizáló szoftverekkel történik. A feldolgozás ennek köszönhetően rendkívül gyors.

Ahhoz, hogy a digitális képek pixel-koordinátaiból térbeli vetületi koordinátákat határozzunk meg – vagyis a felvételeket tájékozzuk – 3 lépésből álló műveletsort kell végrehajtanunk (Szatmári, 2002):

1. **Belső tájékozás:** a lencse és a szkennerek geometriájának meghatározása a kép készítésének időpontjára. Célja a digitális kép pixel koordináta-rendszeréről a térbeli képkoordináta-rendszerre való áttérés transzformációs egyenleteinek megadása. Ehhez meg kell határozni a kép főpont koordinátáit, a fókusz-távolságot, a keretjellek helyét és az optikai elrajzolás értékét. A belső tájékozásra elsősorban akkor van szükség, ha nem digitális géppel dolgozunk, a programok többsége automatikusan számolja az említett paramétereket.

2. **Kölsönös tájékozás:** a térmodellek előállítása a képsorok összetartozó pontjainak – kapcsoló pontjainak – mérésével. (A kapcsoló pontok olyan pontok, melyek vetületi koordinátái nem ismertek, de vizuálisan felismerhetők és képi pozíciójuk azonosítható és mérhető eltérő álláspontokból készített felvételeken.) A kapcsoló pontok mérése, azaz a képek illesztése történhet manuálisan vagy automatikusan. A programok többsége már képes automatikus, vagy fél-automatikus⁶ képillesztésre.



6. ábra: A képegyeztetés sematikus ábrája: A 2 kép vetítési centrumából az összetartozó homológ pontokon keresztül húzott egyenesek a térben a keresett felszíni pontban metsződnek.
Készítette: Raveloson, Visnovitz, 2011

⁶ Manuálisan pár ponttal össze kell kapcsolni a fényképeket, majd a program automatikusan folytatja a képillesztést.

A nagy mennyiségű képi adat miatt a számítási idő csökkentésére, és az egyeztetési eljárások megbízhatóságának növelésére, képpiramisokat szoktak alkalmazni (a piramis adatstruktúra ugyanazt a képet reprezentálja, lépcsőzetesen egyre növekedő felbontással).

3. **Abszolút tájékozás:** a térmodellek vetületi rendszerbe illesztése ismert vetületi koordinátájú illesztő pontok megadásával. A külső tájékozási adatok összekapcsolják a képi koordináta-rendszert a földi koordináta-rendszerrel. Az abszolút tájékozás a kamera helyét leíró 3 térkoordináta az adott vetületi rendszerben, valamint a kamera nézési irányát leíró 3 szög megadása.

A műveletek során fellépő hibaforrások Szatmári (2002) szerint a következők:

- eredeti képanyag hibái,
- belső tájékozás hibája,
- illesztőpontok mérési hibái.

Digitális fotogrammetria a földtudományokban

A digitális fotogrammetria egyre nagyobb szerephez jut a térképek készítése terén is. Egy digitális ortofotó sokkal szemléletesebb képet ad a földfelszínről, a kinyert kép tartalma geometriai pontosságú, előállítása (nagy tömegben) gazdaságosabb, olcsóbb és gyorsabb a vektoros térképnél (Szatmári, 2002).

5.3. A 3D modellező programok

Napjainkban már rengeteg olyan program van (fizetős és nem fizetős egyaránt), mely alkalmas 3D-s képek létrehozására. Ezeknek egy kisebb hányada képes arra, hogy 2D-s leképezésből orto- vagy sztereoszkópiával, 1, 2 vagy több kép felhasználásával hozzon létre 3D-s modellt, automata, fél-automata, vagy manuális képillesztéssel. A manuális képillesztés igen időigényes feladat ezért az utóbbi években a fotogrammetriai kutatások és fejlesztések többsége arra irányult, hogy megoldja az automatikus képillesztést.

Ebben a fejezetben összehasonlítom az interneten fellelhető szoftvereket jellegük (hagyományos/internetes), elérhetőségük (ingyenes/fizetős), a modellezés során használható képek száma (1, 2, több) és a pontok illesztése (automata/fél-automata/manuális) alapján.

Az összehasonlítás során 3 fő csoportot különböztettem meg:

A *hagyományos szoftverek* közé soroltam azokat a képfeldolgozó programokat, melyek működéséhez telepítés szükséges és bizonyos követelményeket támasztanak a használt gép minőségével szemben.

Az *internetes programok* bármilyen internetkapcsolattal rendelkező gépről használhatóak, mivel külső szerveren végzik a képfeldolgozást. Ezen programok többnyire ingyenesek.

A harmadik csoportba nem valódi programok, hanem valamilyen egyéb programhoz (például *MATLAB*-hoz) használható *bővítmények* tartóznak.

5.3.1. Hagyományos szoftverek

A hagyományos 3D modellező szoftverek további 2 fő kategóriába sorolhatók: a földi- és a légi felvételek modellezésére specializálódott programokra. Vannak olyan programok is (például *Erdas LPS*) amelyek mind a légi- mind a földi-felvételek modellezésére alkalmasak.

Egyes programok pedig nem fényképeket hanem videofelvételeket igényelnek a 3D modell elkészítéséhez (ilyen például a *VideoTrace*). Ezekre külön nem térek ki.

Légi-felvételek modellezésére specializálódott szoftverek (2. táblázat):

Ebbe a csoportba azokat a programokat soroltam, melyek leírásuk szerint kizárólag légi- vagy műhold felvételek modellezésére alkalmasak. Többnyire pontos GPS koordinátákat igényelnek, termékeik pedig igen nagy pontosságú DEM-ek és különböző ortofotók.

Program	Fejlesztő	Elérhetőség	Kép szám	Pontkapcsolás
Pix4UAV Cloud	Pix4D	fizetős	10-2000	automata
EnsoMOSAIC	Mosaic Mill	fizetős	több kép	automata
Correlator 3D	SimActive	fizetős	több kép	automata
OrthoMapper	Image Processing Software Ltd	fizetős	1, több	automata

2. táblázat: A légi-felvételek modellezésére alkalmas programok és főbb tulajdonságaik. Ezek közül a fehér betűvel jelzett OrthoMapper csak ortofotó előállítására képes, míg a többi programmal DEM is előállítható.

Földi-felvételek modellezésére alkalmas programok (3. táblázat):

Ebbe a csoportba azokat a programokat soroltam, amelyek nem kimondottan légifelvételek modellezésére készültek. Ide tartozónak ítéltam azokat a programokat is, amelyek csak olyan tárgyak modellezésére alkalmasak amelyek erre a célra kialakított terepasztalon lettek körbefényképezve (ezeket fehérbetűvel jelöltem).

További érdekességként mutatom be az *iWitness* és az *ImageMaster software*-t. Az *iWitness* kimondottan közúti balesetek rekonstruálására találták ki, míg az *Imagemaster* a *Topcon* által gyártott robotgépekhez, de alkalmazható hagyományos fényképezőgépek által készített képek modellezésére is.

Program	Fejlesztő	Elérhetőség	Kép szám	Pontkapcsolás	Kapott fájl kiterjesztések
Insight 3D	Lucas Mach	ingyenes	több kép	automata	.vrm
ImageModeler	Autodesk	Fizetős* ⁷	1 képtől	fél-automata	.obj
PhotoScan	Agisoft	fizetős	több kép	automata	.obj, .ply, .vrm
StereoScan	Agisoft	ingyenes	2 kép	automata	.obj
Imodeler 3D	UZR GmbH	fizetős	több kép	automata	.obj, .vrm
Imodeler 3D web edition	UZR GmbH	fizetős	több kép	automata	video formátumok
Make 3D	Stanford 3D Reconstruction Group	ingyenes (de lekérés szükséges)	1 kép	automata	?
Strata Foto 3D	Strata	fizetős	20-256	automata	.vrm
Bundler	Noah Snavely	ingyenes	több kép	manuális	.ply
Photosculpt	Hippolyte Mounier	fizetős	2 kép	automata	.obj, .ply, .stl
PhotoModeler	Eos Systems	fizetős	több kép	automata	.obj, .vrm
PhotoModeler Scanner	Eos Systems	fizetős	több kép	automata	.obj, .vrm
Elcovision10	PMS AG/Leica Geosystems	fizetős	1,2, több kép	automata, manuális kiegészítéssel	
3DSom	Creative Dimension		több kép	automata	.obj, .vrm
iWitness	DCS Inc	fizetős	több kép	félautomata	.dxf
ImageMaster	Topcon	fizetős	több kép	automata	.vrm, .dxf

3. táblázat: Földi-felvételek modellezésére alkalmas hagyományos programok. Fehér betűvel jelöltem azokat, amelyek csak terepasztalon körbefényképezett tárgyak modellezésére alkalmasak.

5.3.2. Internetes programok

Ezen programok esetén a képek feldolgozását egy vagy több külső szerver végzi és a képeket egy arra alkalmas felhasználói felületen keresztül lehet feltölteni (4. táblázat).

Program	Fejlesztő	Elérhetőség	Kép szám	Pontkapcsolás	Kapott fájl kiterjesztések
Photosynth	Microsoft	ingyenes	több kép	automata	-
Arc3D		ingyenes	több kép	automata	.obj
Photo3D	Per Almund	ingyenes	2 kép	automata	.obj
123D Catch	Autodesk	ingyenes	több kép	automata	.obj
Hypr3D	Viztu technologies	ingyenes	több kép	automata	.obj, .ply

4. táblázat: A külső szervert használó programok és főbb tulajdonságaik.

5.3.3. Bővítmények

A bővítmények közé sorolható az ingyenes *FIT3D* melyet a *MATLAB* programhoz fejlesztettek ki, illetve a *Google SketchUp* programjához kifejlesztett fizetős *PhotoSketch*.

⁷ Kereskedelmi forgalomban már nem kapható, csak más Autodesk programok megvételével lehet hozzá jutni.

6. Módszertan

A módszertani részben ismertetem a terepen végzett munka menetét, a méréshez használt eszközöket, a modellek kivitelezését, az adatbázis kezelését, és a különböző programokkal végzett munka folyamatát.

6.1. A terepi mérés menete és eszközei

6.1.1. A terület bemutatása

Munkám során több felmérést végeztünk a fővárostól délre, Tsiafahy körzetében (7. ábra), 2011 júliusa és augusztusa között. A malgas fennsík részeként a terület dimbes-dombos, 50-500 m-es magasság különbségekkel. Növényzetét füves szavanna jellemzi.

A fennsík nagy részén (ott ahol a körülmények megengedik) a helyiek növénytermesztést és állattartást folytatnak. Így volt ez az általunk felmért körzetben is, ahol elsősorban rizs és manióka földek sorakoztak, és zebu csordák legeltek.

Geológiaiilag Tsiafahy a prekambriumi kristályos alapkőzettel jellemezhető. Nagy valószínűséggel migmatit alkotja a terület nagy részét, gránittal és a felszínre tört magmás kőzetekkel.

A területet nedves, tropikus éghajlatú, novembertől márciusig tartó meleg, esős évszakkal, és egy rövidebb száraz, hideg évszakkal áprilistól októberig. Az éves csapadékmennyiség 1200-1800 mm között ingadozik, de ennek nagy hányada, hirtelen zúdul le az esős évszakban.

A felmérések során az egyes lavakákat körbejártuk, körbefényképeztük és kőzetmintát is vettünk belőlük.

A dolgozatban bemutatott mindkét lavaka viszonylag előrehaladott fázisban volt. Erről tanúskodott nagy méretük és a bennük lévő növényzet is. A főbb különbséget a két lavaka között alakjuk, azaz morfológiai besorolásuk jelentette. Az első lavaka (LAV07) egy 40 m hosszú, 102 m széles, hegylábi lavaka volt. A második lavaka (LAV08) ezzel ellentétben hegyközépi, 72 m-es hosszal és 61 m-es szélességgel.



7. ábra: A mérések területe (rózsaszín téglalappal jelölve) Madagaszkár térképén. Forrás: Geography, 2011

6.1.2. A mérés során használt eszközök

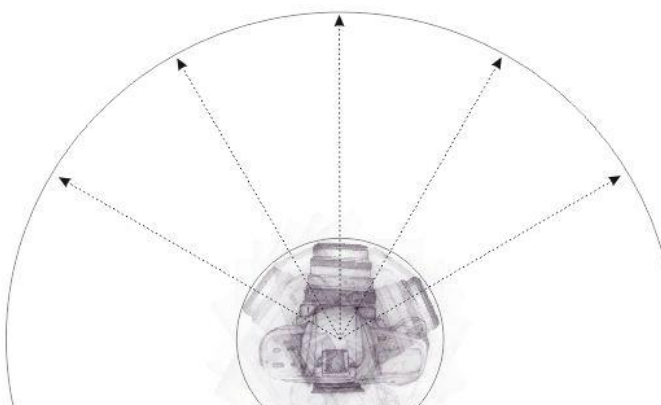
- Fényképezőgép (nagy látószögű, *Fujifilm Finepix HS10* bridge⁸ fényképezőgép),
- Vízszintezővel ellátott 3 lábú *Hama* (tripod) fényképezőgép-állvány,
- *Garmin GPS60* helymeghatározó eszköz, melynek pontossága az adott terepen átlagosan 4 – 5 m között mozgott,
- Tájéoló (fok beosztással ellátott iránytű),
- Jegyzőkönyv (a GPS koordináták, az irány és a fontosabb észrevételek feljegyzésére),
- A lavakák sűrűségét jelölő térkép.



6.1.3. A mérés menete

A felméréshez digitális fényképezőgépet használtunk, melyet egy háromlábú állványra erősítettünk. Az állványra azért volt szükség, hogy a fényképezőgép ne mozduljon 2 kép készítése között és mindig vízszintesen álljon. Az állvány segítette továbbá a fényképezőgép rögzítését, hogy ne mozduljon el miután beállítottuk a fénykép szögállását.

A fényképezést igyekeztünk olyan pontokból végezni, ahonnan a lavakának a nagy része jól belátható volt. Ezeken a pontokon először felvettük a GPS koordinátákat illetve a tájoló segítségével beállítottuk a kezdeti irányszöget. 2 fénykép között az állvány fejét mindig 30°-kal fordítottuk tovább, biztosítva ezzel a képek közötti megfelelő átfedést (8. ábra).



8. ábra: A fényképezőgép állásai a mérés során. 2 fénykép között mindig 30°-ot forgattunk a kamera állásán.
Készítette: Raveloson, 2011

Amikor egy adott pontról körbe fényképeztük a lavakát, tovább mentünk a következő állásponthoz és az egész műveletet előlről kezdtük mind addig, míg körbe nem értünk.

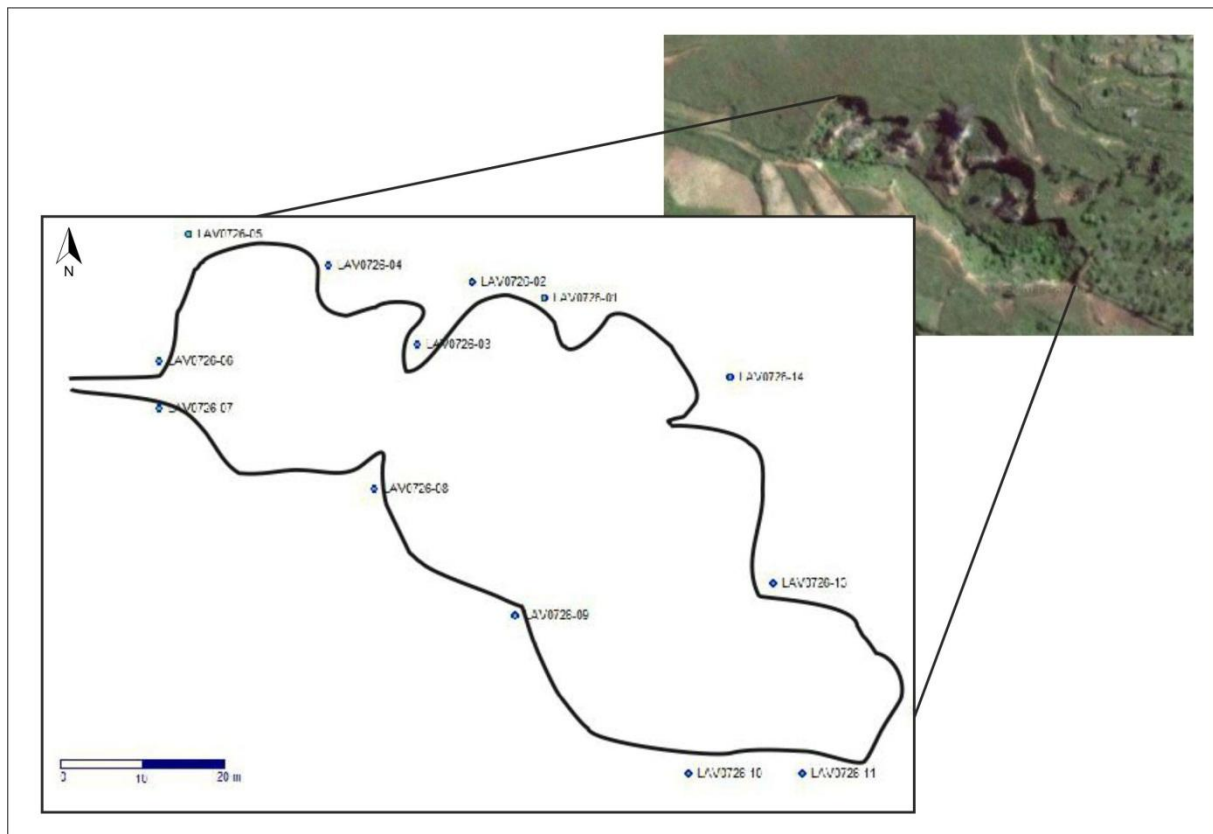
A mérés során az egyes képekhez tartozó GPS koordinátákat, a fényképezőgép azimutszög állását táblázatosan rögzítettem, és a terepen tett fontosabb észrevételeket táblázatosan rögzítettem.

⁸ Átmenetet képez a kompakt és a tükörreflexes fényképezőgépek között.

Az első mérés

Az első lavaka (LAV07) egy hegylábi lavaka volt. Ennek alakját, illetve a felvett GPS pontokat mutatja a 9. ábra (a kék körök jelölik a GPS pontokat, azaz azokat a pontokat ahonnan a képeket készítettük).

A mérés során törekedtünk arra, hogy éles és világos képeket készítsünk. A lavaka Ny-i részét azonban már késő délután mértük föl, így a nyugvó félben lévő Nap nagymértékben befolyásolta a képek minőségét.

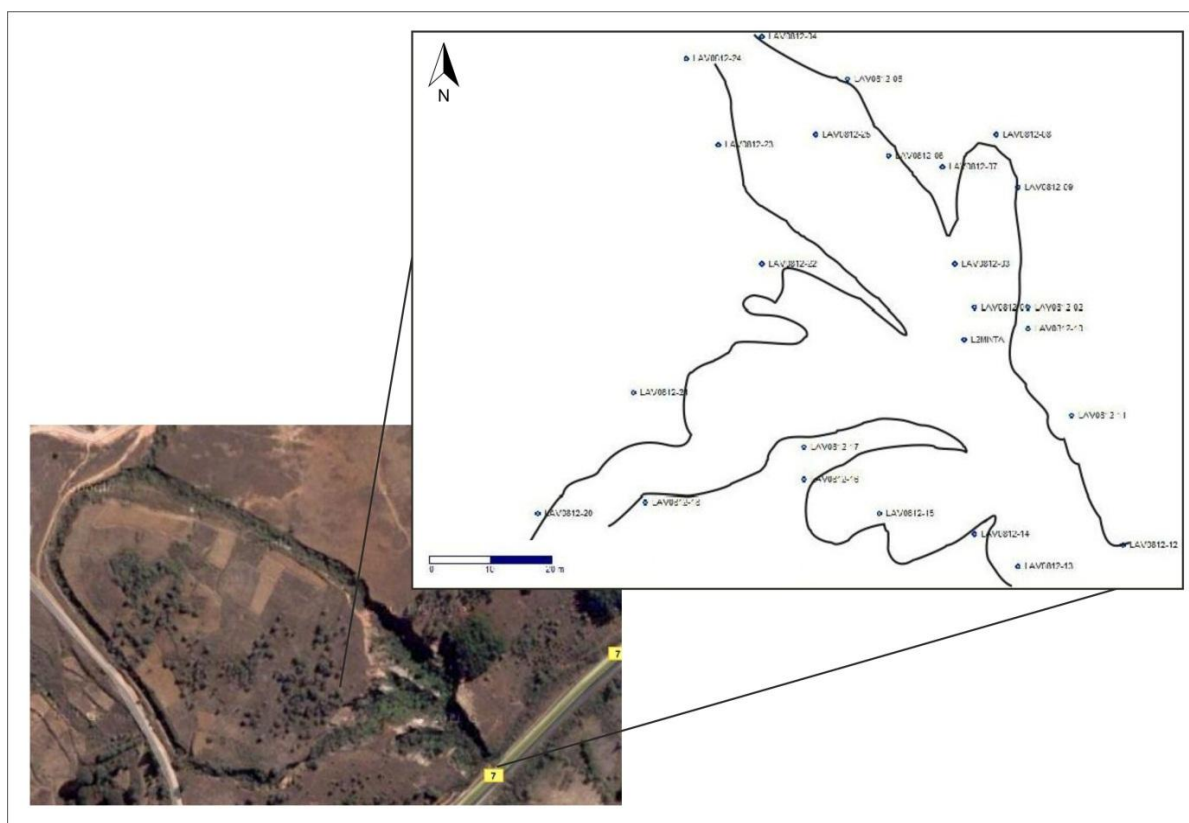


9. ábra: A LAV07-es jelzésű lejtőlábi lavaka alakja. Kép forrása: Google Earth, 2011. A sematikus ábrán kék körök jelölik a mérési pontokat. Mellettük a GPS azonosító látható. Készítette: Raveloson, 2011

A második mérés

A LAV08-as jelzésű lavaka mérésénél már törekedtünk arra, hogy korábban elvégezzük a mérést, csökkentve ezzel a Nap zavaró hatását. Itt azonban a lavaka magas falai és dús növényzete okozott gondokat, mivel beárnyékolta a területet, és az egyes falrészletek gyakorlatilag teljesen eltűntek a növényzet mögött. Problémát okozott továbbá, hogy egy teljesen aktív lavakáról volt szó, melynek falai a súly hatására bármikor beomolhattak. Ügyelnünk kellett tehát arra is, hogy ne álljunk a több méter magas fal szélére, de azért megfelelő belátásunk legyen a fényképezni kívánt területre. A zavaró hatásokat próbáltuk azzal ellensúlyozni, hogy a lavaka belsejéből is készítettünk fényképeket. Erre azért is volt

szükség, mert egy igen összetett lavakáról volt szó. (Ezt mutatja a 10. ábra is, melyen a kék körök jelölik a fényképezések helyét.)



10. ábra: A LAV08-es jelzésű lavaka alakja a Google Earth (2011) alapján illetve sematikus ábrán. A mérési pontokat kék körök jelölik. Mellettük a GPS azonosító látható. Készítette: Raveloson, 2011

6.2. A modell kivitelezése

A modell készítése több szempontból is elengedhetetlennek bizonyult a lavakizáció megértésében. A terepen töltött idő ugyanis limitálva volt, és egy megfelelő modell lehetővé tenné, hogy további felméréseket, megfigyeléseket tegyek a lavakákkal kapcsolatban. Fontos továbbá az is, hogy egy modell sokkal szemléletesebbé teszi a jelenség bemutatását, mint néhány fotó, valamint megfelelő modellel a lavakák morfológiája is számszerűsíthető.

A modellezés során törekedtem a neten elérhető 3D modellező programok összehasonlítására, a LAV07-es lavaka adatainak betáplálásával. A jobbnak bizonyult programokkal megpróbálkoztam a bonyolultabb szerkezetű LAV08-as lavaka modelljének előállítására is, ez azonban nem sikerült, ezért témavezetőmmel közösen elkezdtek egy manuális képillesztésen alapuló modell fejlesztését. Ebben a fejezetben a letesztelt és működőképes 3D modellező programokat, illetve a félautomata modell kivitelezését mutatom be.

6.2.1. A 3D modellező programok bemutatása

2 képből létrehozott 3D-s modell

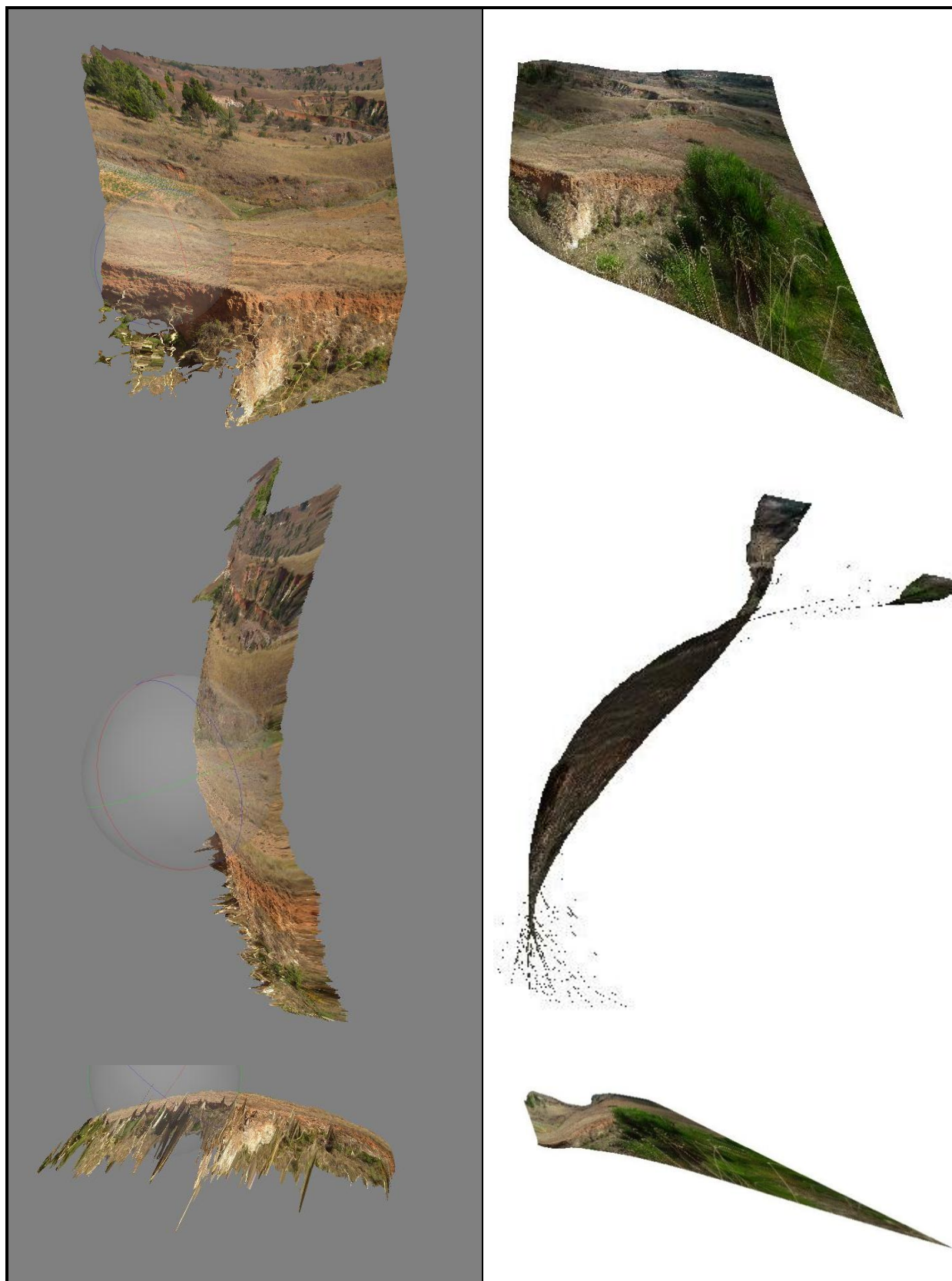
A 2 képből készült programok gyakorlatilag semmilyen szinten nem tudták visszaadni a lavaka egyes részeit, ezért ezekkel csak érintőlegesen foglalkozom. 2 programot teszteltem le, az ingyenes StereoScan-t és a PhotoSculpt próba verzióját.

A több képből készült modellekkel szemben a 2 képből készült modellek előfeltétele, hogy 1 pontból készítsünk két képet nagy átfedéssel. Ha a képek nagyon különböznek egymástól a program nem tudja őket feldolgozni. A lavakák esetén valószínűleg a képek részletgazdagsága, a növények zavarása és a képek közötti „kis” (~50%) átfedés miatt nem sikerült megfelelő modellt kapnom.

A fent említett mindkét program automata, ezért csak a képeket kellett betáplálni és a futtatás gomb lenyomása után alig 1-2 perccel már elő is állt az eredmény.

A kapott modellt szemből, oldalról és alulról mutatom be, az 5. táblázatban:

Agisoft StereoScan	Photosculpt
 Az Agisoft Photoscan ingyenes, „próba” verziója. Fontos, hogy kicsi legyen a használt képek irányszögeinek eltérése különben nem tudja feldolgozni az adatokat.	 Futtatásához Microsoft Direct X szükséges. Betölthető akár kétszer ugyanaz a kép, de az eredmény nem túl meggyőző. Mutatja a munka folyamatát, azaz a modell alakulását.



5. táblázat: 3D modell 2 képből. Jobbra a Stereoscan, balra pedig a Photosculpt által kapott eredmények láthatóak ugyanarra a falrészletre, szemből, oldalról és alulnézetből.

Több képből készített 3D-s modellek: A több képet kezelő programok már jóval nehezebben hasonlíthatók össze, mivel különböző igényeket támasztanak az input fájlokat illetően és más-más módszerrel dolgoznak. Céлом az összehasonlítás során az volt, hogy jellemezzem mennyire használhatóak az egyes programok, az általam készített lavakák fényképek feldolgozására, azaz mennyire sikerült velük az egyes lavakák modellezése.

Az itt használt programok egy része internetes kapcsolatot igényel, az eredmény megérkezése pedig elég bizonytalan. Jó esetben 1-2 órán belül megkapjuk az eredményt, de kirívó esetekben heteket is kellett várnom 1-1 modellre. Előnyük azonban a hagyományos szoftverekkel szemben, hogy mivel külső szerver végzi a modellezést nem támasztanak alá különösebb követelményeket a használt számítógéppel szemben. (Egy „hétköznapi” gépen egyszerre maximum egy program futtatható, és mellette gyakorlatilag semmilyen más kicsit igényesebb program nem működtethető.)

A modellezés szempontjából az volt a döntő, hogy manuálisan kell-e a pontkapcsolást megoldani, vagy a program képes automatikus képillesztésre. A manuális megoldás ugyanis nagyon időigényes. A kívánt eredmény függvényében fél naptól akár hetekig tartó munkát jelenthet, míg az automatikus képillesztés a programok többségénél 1-2 óra, maximum fél nap alatt megoldható. Egyes jobb programok rendelkeznek mindkét féle képillesztési módszerrel, így ha nem vagyunk megelégedve a megoldással manuálisan belenyúlhatunk és alakíthatjuk a modellt. Ezek a programok azonban igen drágán kaphatóak és a legtöbb esetben valódi „mérő kamerával” készített fényképeket igényelnek a modellezéshez.

Munkám szempontjából a legkomolyabb problémát a fizetős programok kipróbálása jelentette. Legtöbb esetben elérhető volt ugyan egy ingyenes 10-30 napos próbaverzió, de ezek kivétel nélkül valamilyen felhasználói korlátozást is magukba foglaltak, mely esetenként azt jelentette, hogy a próbaverziót előre betáplált képekkel lehetett csak kipróbálni.

A legtöbb szoftver további szerkesztési lehetőségeket is nyújt, illetve többségükönél az általuk létrehozott pontfelhő/pontháló menthető olyan formátumban, mely lehetővé teszi, hogy *MeshLab*⁹-ben vagy egyéb 3D megjelenítő és szerkesztő programban tovább szerkeszthetőek legyenek.

A modellezés során egy lejtőlábi lavaka adatállományával végeztem el az *Insight3D*, *Imagemodeler 2009*, *Agisoft Photoscan*, *Photosynth*, *123D Catch*, *Arc3D*, és *Hypr3D* programok összehasonlítását.

⁹ 3D-háló feldolgozására alkalmas ingyenes szoftver, mely az alábbi formátumokat tudja kezelni: PLY, STL, OFF, OBJ, 3DS, VRML, U3D, X3D és COLLADA

Ezek közül az *Insight3D*, az *Imagemodeler* és a *123D Catch* nem adott értékelhető eredményt. Az *Insight3D* olyan kritériumokat támasztott alá a fényképes adatrendszerrel szemben melyek nem teljesültek (15-25°-os szögváltás, ne legyenek sötétebb, elmosódott területek, stb.). Az *ImageModeler* pedig valójában építészeti célokra készült, inkább kíváncsiságból próbáltam ki a programot, mintsem használható eredmények reményében. A *123D Catch* esetében nem sikerült rájönni a hiba okára, mivel egy internetes programról van szó és a modellezés folyamata nem követhető.

A legjobbnak bizonyult modellekkel (*PhotoScan*, *Hypr3D*) megpróbálkoztam a lejtőközépi lavaka modellezésére is. A lavaka bonyolult struktúrája, dús növényzete és magas falai miatt azonban semelyik program nem volt képes megfelelően rekonstruálni a valós formákat ezért egy olyan programot alkalmaztam, melyet témavezetőm kimondottan erre a célra írt *MATLAB*-ban.

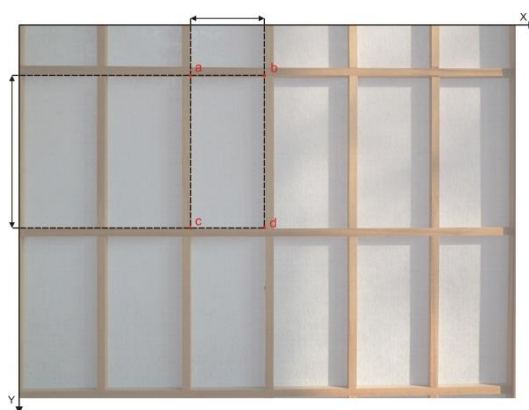
6.2.2. A félautomata modell megalkotása

Az előző fejezet részben említett programok közül a legjobbak sem voltak képesek az összetett szerkezetű lejtőközépi lavaka megfelelő reprezentálására, ezért neki láttunk *MATLAB*-ban egy félautomata 3D-s modell megalkotásához, melyhez a programot témavezetőm írta, míg a szükséges bemeneti adatrendszert én állítottam elő.

A modellezés során követtük a már korábban említett 3 lépésből álló műveletsort:

1. Belső tájolás

A belső tájolás elvégzése érdekében különböző képeket készítettem ismert méretű négyzetrácsos tárgyról (paraván, konyhai csempe) adott távolságból, merőlegesen. Az ismert pixelszámú képek és az ismert méretű tárgyak összevetésével kaptam meg a kamera érzékelő lapkájának és a fókusz távolságának arányát, amiből a fókusz távolságot pixelben fejeztem ki.



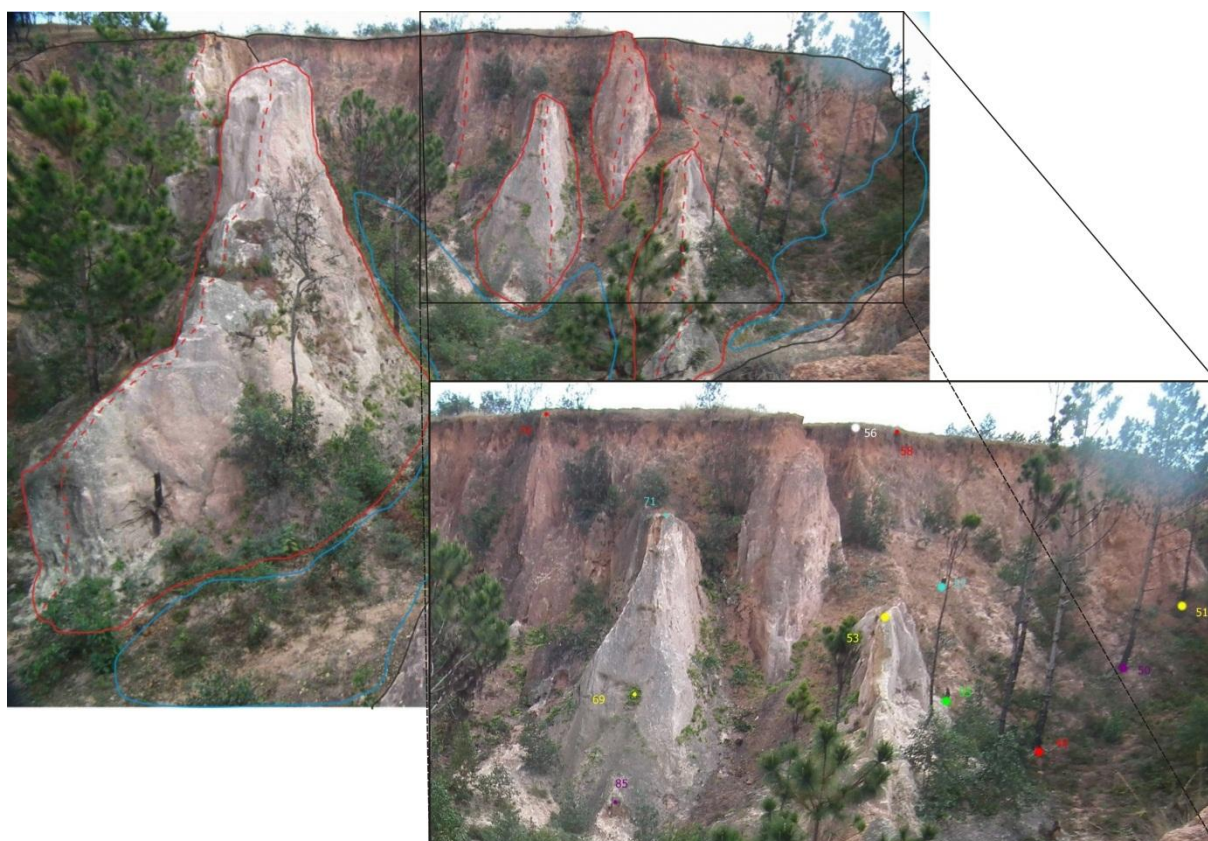
11. ábra: A belső tájékozáshoz használt paraván képe. Készítette: Raveloson, 2011

2. Kölcsönös tájolás:

A pontazonosítást a modell szempontjából fontosnak vélt képeken végeztem el. Ennek során törekedtem olyan, lehetőleg pontszerű tárgyak pixelkoordinátáinak meghatározására, amelyek több képen, több síkból is jól felismerhetőek. Nem elegendő ugyanis, hogy egy pont jól látszódjon; szükséges az is, hogy ugyanannak a pontnak a koordinátáit legalább még egy

másik álláspontból készült képen egyértelműen be tudjam azonosítani. Nehézségeket okozott azonban, hogy egy lyuk a falon közelről és távolról, illetve a különböző síkokból egész másnak tűnhet. Gondot okozott továbbá a képek minősége, mely gyakran nem volt megfelelő, a szembesítő Nap, egy fal árnyéka, vagy egyéb tényezők miatt. Problémát okozott a pontazonosításban a lavaka növényzete is, amely a különböző síkokból különböző falrészleteket takart el, valamint nem utolsó sorban a lavaka jellegéből adódó adathiány (bizonyos területek lefényképezését ugyanis alig vagy egyáltalán nem tudtuk megoldani).

A pontazonosításnál törekedtem arra, hogy a lavaka jellegzetességeit (11. ábra) megfelelően reprezentáljam. Ennek érdekében olyan pontokat vettem fel, melyek követik a lavaka falait, aljzatát, gerincmaradványait. Igyekeztem a falak meredekségének pontosítására, az ott található törésvonalak, mélyedések megjelölésével. A piramis elvet követve, igyekeztem először csak 1-2 ponttal összekötni a képeket, majd egyre részletesebben megjelölni őket.



12. ábra: A pontazonosítás során kiemelendő területek (fekete: perem, piros: gerincmaradványok, kék: aljzat) és ugyanakkor a képnek egy részletén bejelölt pontok az azonosítás kezdetén. Készítette: Raveloson, 2011

A koordináták leolvasását *Photoscape* képszerkesztő programmal végeztem és a képeken különböző színnel jelöltem a felismert pontokat. Munkám során több 100

PONT	KÉP	X	Y
302	6991	1973	1724
302	6990	404	1828
302	6986	1309	985
303	7010	2705	1336
303	7011	1738	1228
303	7012	357	1351

13. ábra: A képekhez rendelt pontok és ezek xy pixelkoordinátái.

pontot azonosítottam. Az egyes pontokhoz tartozó képeket, illetve a képen belüli xy pixelkoordinátákat Excel adatkezelő programban rögzítettem (13. ábra).

3. Abszolút tájolás

A mérés során feldolgoztam, illetve digitalizáltam az egyes képekhez tartozó GPS koordinátákat, és a fényképezőgép tengelyének azimutszögét. Ezeket Excel adatkezelő programban gyűjtöttem össze (14. ábra).

GPS pont	KÉP	fok	S	E	h	hiba
LAV0812-04	6900	90	19°05.533'	047°31.983'	1348	6
LAV0812-04	6901	120	19°05.533'	047°31.983'	1348	6
LAV0812-04	6902	150	19°05.533'	047°31.983'	1348	6
LAV0812-04	6903	180	19°05.533'	047°31.983'	1348	6
LAV0812-04	6904	209	19°05.533'	047°31.983'	1348	6
LAV0812-05	6905	42	19°05.537'	047°31.991'	1349	5
LAV0812-05	6906	70	19°05.537'	047°31.991'	1349	5
LAV0812-05	6907	99	19°05.537'	047°31.991'	1349	5
LAV0812-05	6908	130	19°05.537'	047°31.991'	1349	5

14. ábra: A képekhez tartozó GPS pontok és azimutszögek.

A MATLAB forrásnyelvű program működése:

A program csak úgy, mint a már korábban említett programok a fotogrammetria alapelveit alkalmazza.

A futtatás során meg kell határozni a képek feldolgozásának sorrendjét. A program az elsőnek kijelölt kép állásponti koordinátáit és tájolási szögeit rögzítettnek tekinti, ezért nagyon fontos egy olyan képet kiválasztani elsőre, amely kisebb GPS hibával rendelkezik és megfelelően lett tájolva. Ehhez a képhez a program először 1 képet ad hozzá és a kapcsolódó adatbázisból kiválasztja azokat a pontokat, amelyek mind a két képen szerepelnek. A pontok térbeli (xyz) koordinátáit a GPS-szel felmért álláspontok koordinátái alapján becsüli. Ezt követően a program egy (előredefiniált számú lépésből álló) iteráció során úgy változtatja meg a második kép álláspontját és tájékozását, hogy a két kép külső tájékozásával számolt pontoknak az egyes képekre számolt képi koordinátái a legjobban megközelítsék a leolvasott koordinátákat. A 3. képnél már a 2. képnél számolt koordinátákat is fixnek fogja tekinteni és így tovább.

A stabil megoldás elérése érdekében az első 5 képet, úgy választottuk meg, hogy ezek mindegyike más álláspontból legyen felvéve, és sok átfedő pontot (képpáronként minimum 20-at) tartalmazzanak. A további hozzáadott képeknél arra ügyeltünk, hogy a képeknek legalább 10 közös pontja legyen az első 5 kép valamelyikével.

A fél automata modell készítésének egyik nagy előnye, hogy a modell tájolható a GPS koordináták segítségével. Mivel azonban a GPS koordinátákat nagy hiba terhelte kiegyenlítő számításokkal próbáltuk ezeket is javítani a modellezés során. A GPS pontok, illetve a képekhez rendelt pontok egymáshoz viszonyított helyzetének vizsgálatával a program automatikusan újraszámolta a felvett GPS-pontok valódi elhelyezkedését.

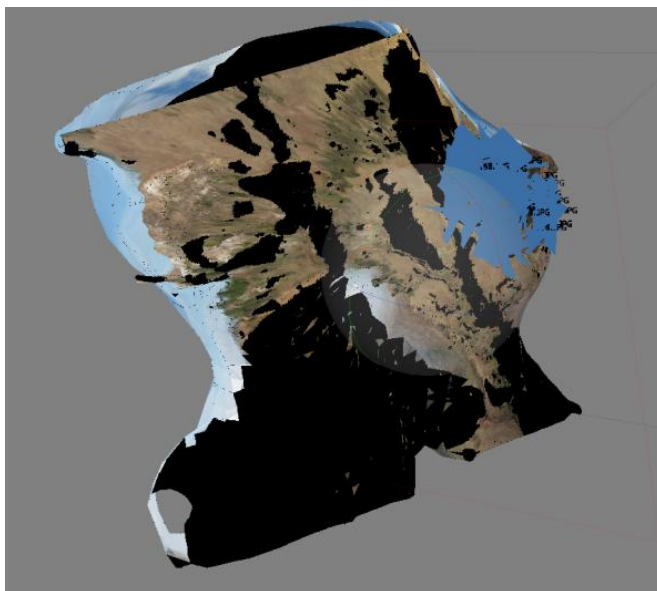
7. Eredmények

A legtöbb program esetén elmondható, hogy nagy segítséget nyújtott a tesztelés során, hogy ortofotó rendelhető a kapott 3D modellhez, annak ellenére, hogy a képillesztés nem mindig volt megfelelő. Azoknál a programoknál (például *Arc 3D*) ahol nem rendelhető ortofotó az elkészített modellhez nem minden esetben sikerült felismerni a modellezni kívánt lavakát hiszen ezek a programok nem tájolják a modellt, s így azt sem tudni merre van rajtuk észak.

7.1. A modellező programok eredményei a lejtőlábi lavakára

7.1.1. PhotoScan

Az *Agisoft* fizetős programja, teljesen automatikusan működik. A képek betáplálása után, gyakorlatilag csak várni kell. "Hátránya", hogy hétköznapi gépeken a program elég lassan fut és ez idő alatt a gép gyakorlatilag teljesen használhatatlanná válik. A végeredmény azonban magáért beszél. A próba verzió hátránya, hogy nem lehet kiexportálni illetve menteni a kapott eredményeket és a programon belüli további szerkesztés lehetőségei igen korlátozottak. Az eredmény ugyanakkor nagyon részlet gazdagon

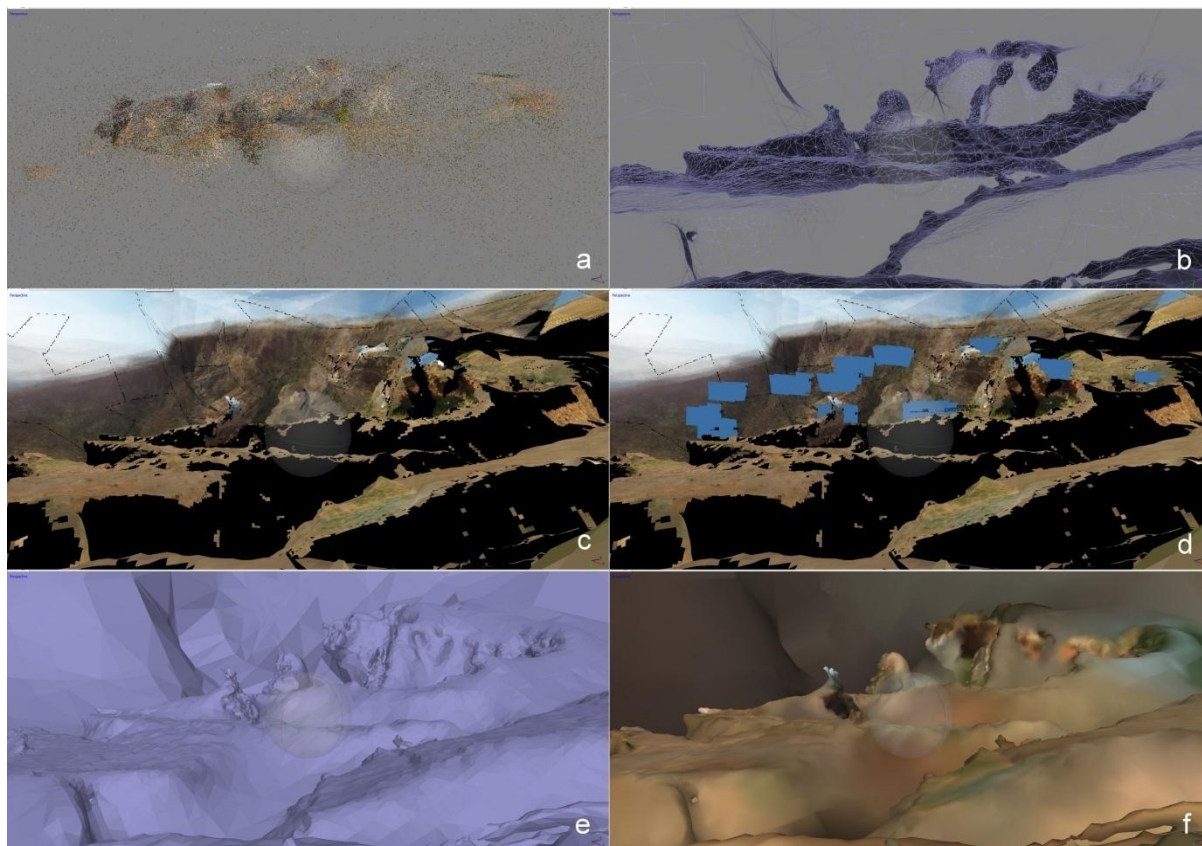


15. ábra: a *PhotoScan*-nel kapott modell képmetszete. A sötétkéék területek (fényképek jelölése a modellben) fogják közre a számunkra fontos lavaka területét. A fekete részek az adathiányos területeket jelölik.

visszaadta a lavaka egyes részeit. A körülötte lévő rizsföldeket gyakorlatilag kockánként rekonstruálta. A részletes megjelenítés hátránya azonban, hogy az éggel mintegy buborékszerűen „körbezárja” a modellt, így a lavaka nagyon nehezen vizsgálható.

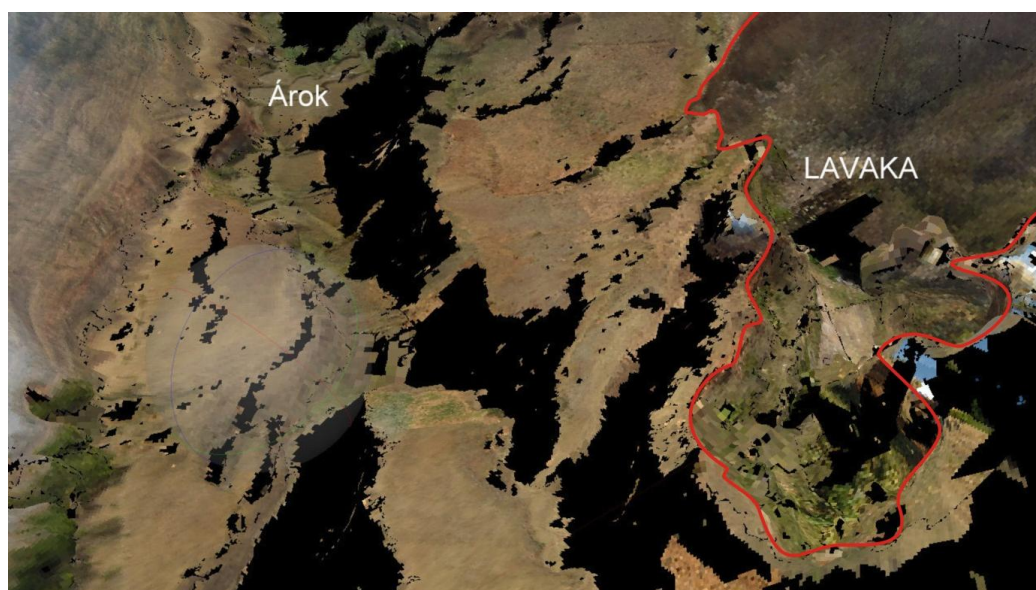
A kapott eredmény megjeleníthető ortofotóként (15. ábra), háromszög modellként vagy pontfelhőként. Az utóbbi kettőhöz különböző textúra elemek is rendelhetőek (16. ábra). A program egyik nagy előnye, hogy az általa feldolgozott képek és azok állása a modellbe integrálhatóak, így ha egy kép tájolását a program nagyon elrontotta ez a modellbe láthatóvá válik. Arra ugyan nincs lehetőség, hogy javítsunk a kép tájolásán, de a képet egy újabb modellezés során ki lehet hagyni a folyamatból javítva ezáltal a modell minőségén.

A hátrányokhoz sorolható, hogy a *PhotoScan* csak automatikus képillesztéssel dolgozik, így nincs lehetőség az általa adathiányos területként megjelölt, az ortofotókon fekete területekként megjelenő részek javítására, kiegészítésére (17. ábra).



16. ábra: A modell megjelenítésének formái a *PhotoScan* programon belül. a: pontfelhő, b: TIN háromszögrács, c és d: ortofotó, és d ábrán a képek (kék téglalapok) tájolása is látható, e és f további texturális megjelenítési formái a háromszögrács modellnek.

A modell fölül nézeti képének egy részlete a 17. ábrán látható.



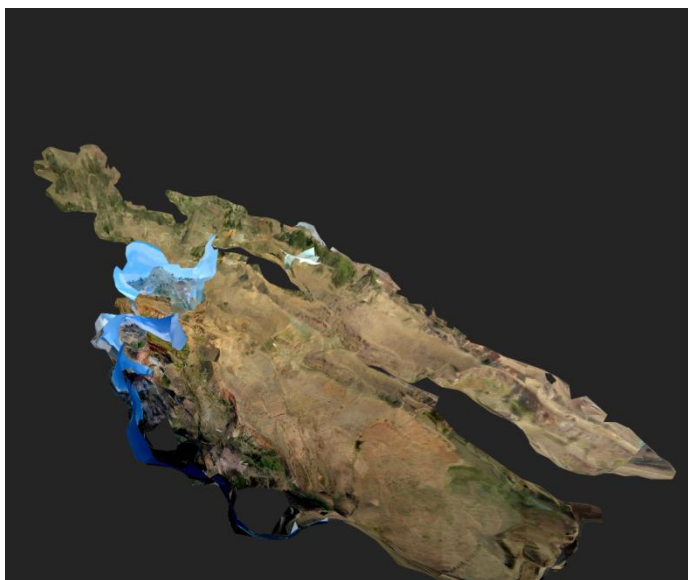
17. ábra: A modellezett terület ortofotója felülnézetből. Piros görbével jelöltem a lavaka határát. Feketével jelöli a program az adathiányos területeket. Az itt-ott beékelte kék területek a képillesztési hibákból származnak.

A 17. ábra jól mutatja, hogy a program nem csak a lavakát, de a mellette lévő rizsföldet is nagyon jól lemodellezte. A rizsföld baloldalán található adathiányos rész annak köszönhető, hogy egy árokról lévén szó ez a terület a lavaka felőli oldalról készített fényképeken nem kivehető.

7.1.2. Hypr3D

Ingyenes, internetes, gyors program. Használata nem igényel mást, csak egy felhasználói nevet.

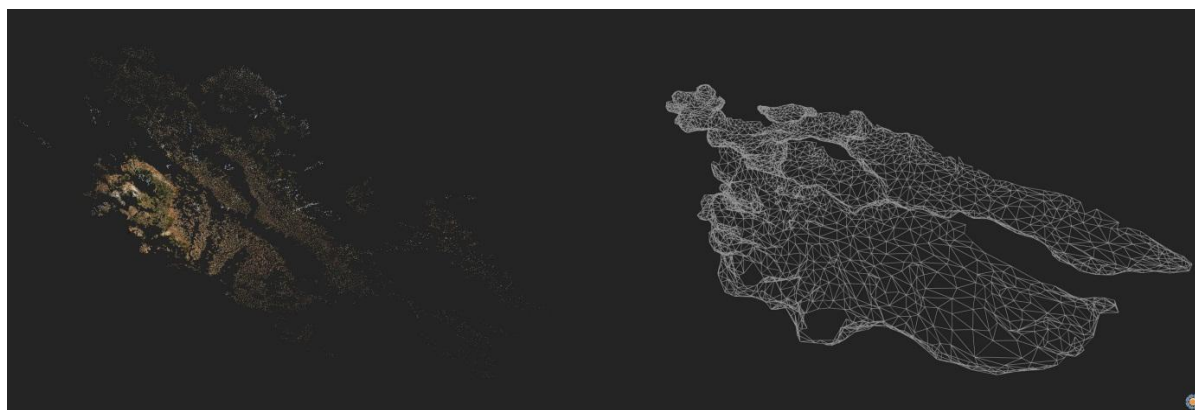
A képek egyszerűen feltölthetők és 0,5 – 1 óra alatt már kész is a modell, mely különböző formátumokba (.ply, .stl) letölthető és *MeshLab*-ben tovább szerkeszthető. Az eredmény itt is meglepően jó, főleg ha az idő és ár függvényében viszonyítjuk egymáshoz a programok teljesítményét. A *Hypr3D* hátránya, hogy érzékeny a képek élességére és



18. ábra: Képmetszett a *Hypr3D*-ban kapott ortofotóról. A modell innenső részét, azaz a lavaka nyugati oldalát a program a képek sötétsége miatt nem tudta leképezni.

fényviszonyaira. A kicsit sötétebb képeket (így például a késő délután fényképezett nyugati oldalt) semmilyen formában nem tudta integrálni a modellbe (18. ábra). Gondokat okozott az ég és a növényzet is, illetve komolyabb munkák esetén problémás lehet, hogy a felhasznált képek mennyisége limitálva (egyszerre maximum 60 képet képes feldolgozni).

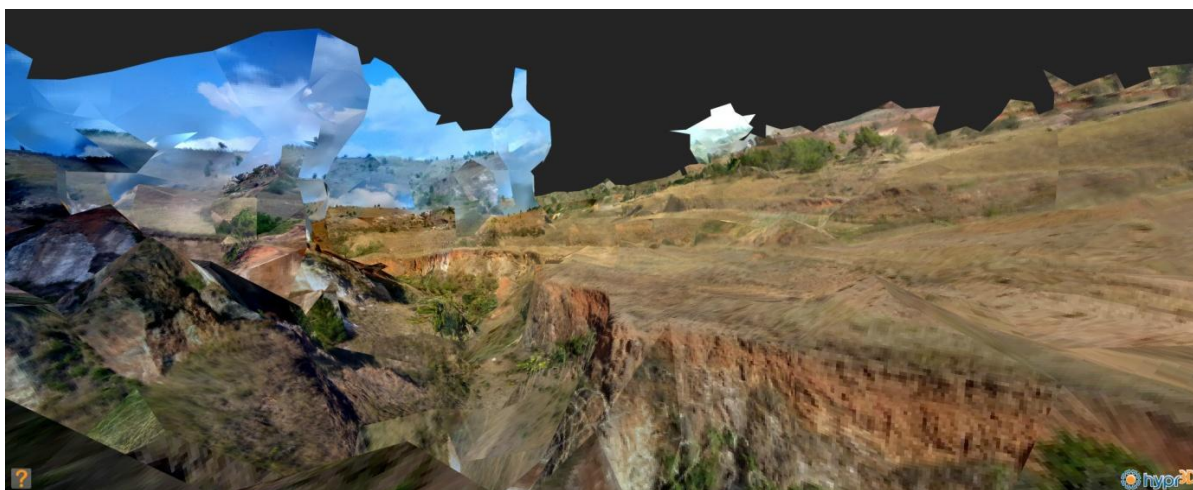
A kisebb nagyobb korlátok ellenére a *Hypr3D* szépen lemodellezte a lejtőlábi lavakát és a *Photoscan* próbaverziójával ellentétben a kapott pontfelhő és háromszög modell (19. ábra) különböző formátumban is menthető.



19. ábra: A modell megjelenítési formái a *Hypr3D*-ben (pontfelhő és TIN)

A Hypr3D adta modell tovább finomítható *MeshLab* program segítségével. Ez többek között azt jelenti, hogy eltávolíthatóak a számunkra felesleges területek, beállítható és menthető a kívánt képi nézet.

A már korábban említett tulajdonságokon kívül fontos megemlíteni, hogy egy teljesen automata modellről van szó, mely a *PhotoScan*-nel ellentétben nem képes a képek tájolásának bemutatására. A modell tehát csak annyira javítható amennyire ezt a *MeshLab*-ben végzett változtatások engedik. Ez tulajdonképpen azt jelenti, hogy a felesleges, túllógó részletek (ég, növényzet) egy része eltávolítható, s ezáltal a modell javítható.



20. ábra: A LAV07 déli oldala a *Hypr3D*-ben kapott modell alapján. Az északnyugati oldallal ellentétben ennek az oldalnak a képillesztése is nagyon jól sikerült, mivel egy alacsony és kevésbé összetett falról van szó.

7.1.3. Photosynth

A *Microsoft* által kifejlesztett program amely interneten keresztül érhető el. Saját fiók létrehozása után már kezdődhet is a képek feltöltése, és 1-2 órán belül kész is a modell (21. ábra). A program hátránya azonban, hogy inkább egy panorámaszerű képet hoz létre mintsem egy valódi 3D-s modellt.

A *Photosynth* ugyan gyárt egy pontfelhőt, de amellett, hogy igen kevés pontból áll letöltésére nem nyújt lehetőséget, és nincs mód a modell felülnézetből történő vizsgálatára sem. A program előnye azonban, hogy nagyon gyorsan képes generálni egy igen mutatós panoráma jellegű képet, mellyel virtuális sétát tehetünk a terepen. A korábban említett programoknál kevésbé érzékeny a fényviszonyokra és a képek minőségére, de a kapott pontfelhő is jóval kevesebb elemből áll, tehát jóval kevesebb ponttal végzi el az illesztést, ami egy valódi 3D modell megalkotása esetén komoly hiányosságokat vetne fel.

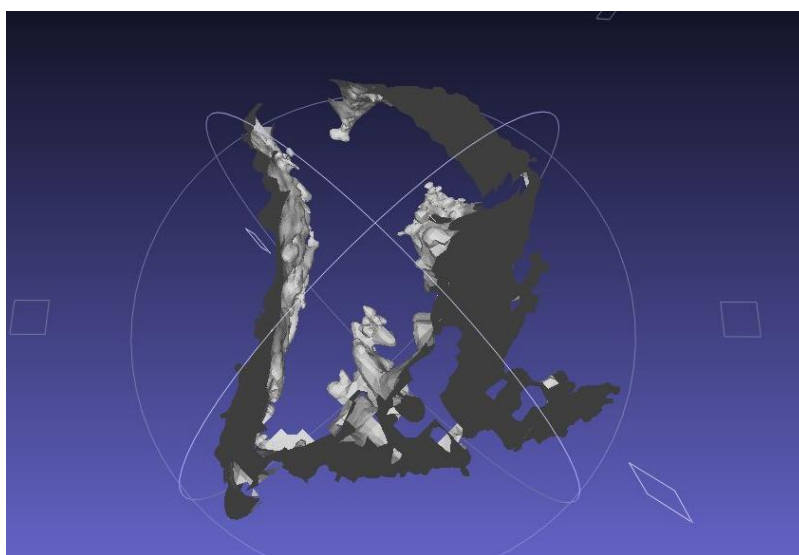


21. ábra: A *Photosynth* megjelenítési formája eltér a hagyományos programoktól, mivel nem egy valódi 3D képet kapunk, csupán az eredeti képek tájolását és az egymáshoz viszonyított elfordítását végzi el.

7.1.4. Arc3D

Az *Arc3D* egy internetes program. Le kell hozzá tölteni egy egyszerű kis felhasználói felületet, amin keresztül a képek felkerülnek a szerverre (ez azonban a továbbiakban nem használható a kapott modell megnyitására és szerkesztésére). A képek feltöltését követően a modellezés automatikusan történik, és email értesítés érkezik, ha a modell elkészült. A kapott modell *MeshLab*-bel megnyitható és szerkeszthető (22. ábra).

A program hátránya, hogy nem lehet tudni mennyi idő alatt készül el a modell (elkészül-e egyáltalán). 7 próbálkozásból 3-ról kaptam visszajelzést, azt is több nappal-héttel az adatok betáplálása után. Sajnálatos módon hiba üzenet sem érkezik, így nem lehet tudni miért nem sikerült a



22. ábra: az *Arc 3D* által kapott modell megjelenítése *Meshlab*-ben.

modellezés. Ugyancsak gondokat okoz a modell értelmezése. Nem ismert ugyanis a program által használt koordináta rendszer és mivel ortofotót nem rendel hozzá, nem sikerült felismernem a modellezni kívánt forma részeit. Ez azonban nem azt jelenti, hogy az *Arc3D*

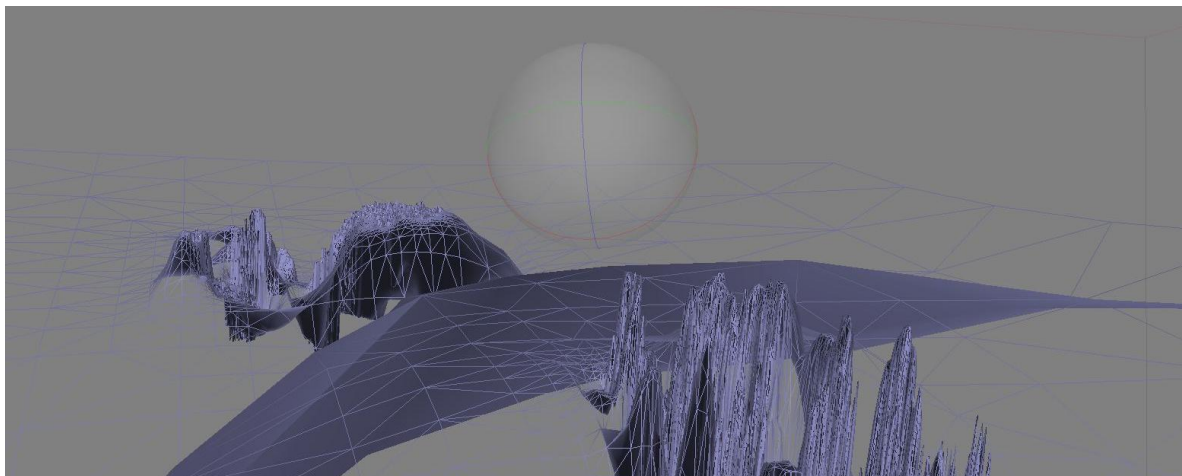
egy rossz program lenne. Előfordulhat, hogy a betáplált fényképek minősége, a képek közötti átfedés vagy egyéb okokból nem sikerült a modellezés. Tulajdonképpen fennáll az a lehetőség is, hogy a kapott modell „jó”, de az esetleges adathiány és a többi programnál is észlelt zavaró tényezők (növényzet, ég) befolyásolják a lavaka egyes részeinek felismerését.

7.2. A modellező programok eredményei a lejtőközépi lavakára

Mivel a lejtőközépi lavaka jóval összetettebb felépítésű volt, mint a lejtőlábi, a modellezést csak azokkal a programokkal végeztem el, melyek a lejtőlábi lavakát megfelelően reprezentálták (*PhotoScan*, *Hypr3D*).

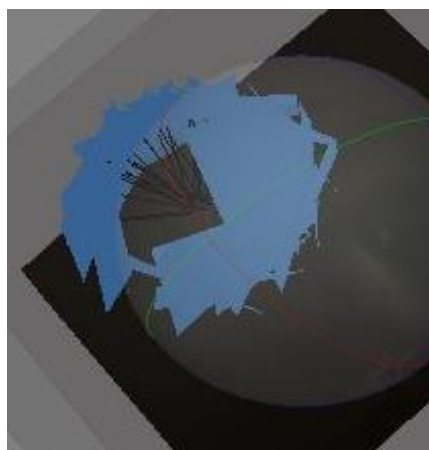
7.2.1. PhotoScan

A *PhotoScan* programmal modellezett lejtőközépi lavaka esetén semmilyen összefüggést nem találtam a valós formával (23. ábra).



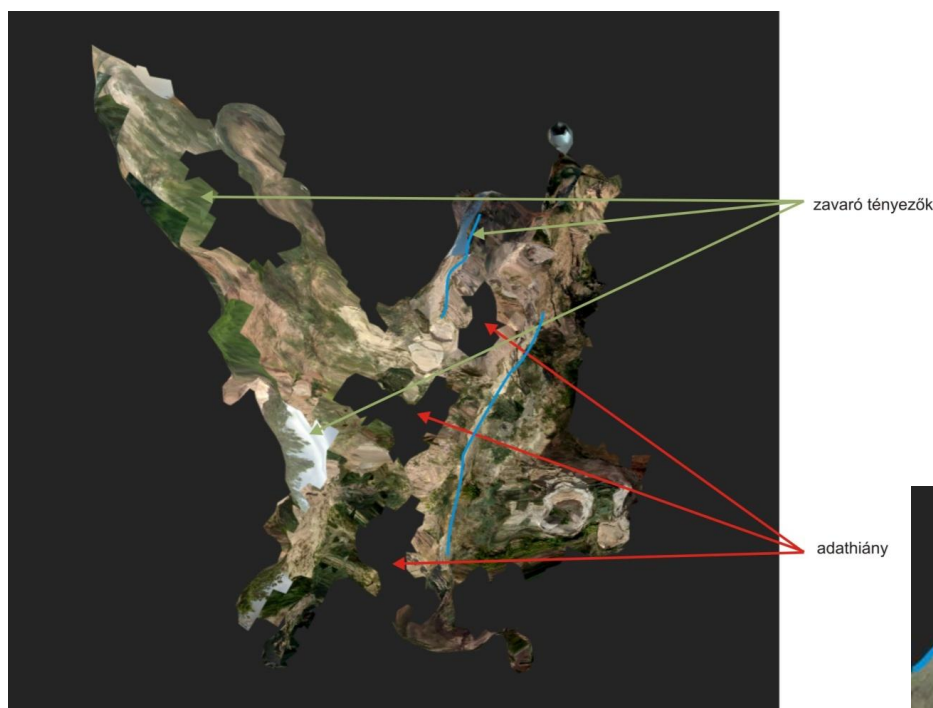
23. ábra: A lejtőközépi lavaka modellezése során kapott háromszög modell a PhotoScan programmal.

Ennek oka nyilvánvalóan az volt, hogy a program rosszul végezte el a tájolást, pontosabban nem volt képes elvégezni, mivel abból a feltételezésből indult ki, hogy a képek egy körön készültek, melynek középpontjában volt a fényképezendő tárgy. Ez látható is a 24. ábrán, ahol a kék téglalapok a képeket, a fekete vonalak pedig azok optikai tengelyének irányát jelölik, melyek gyakorlatilag a képzeletbeli kör sugarainak felelnek meg. Mivel a pontfelhő is rossz volt a program már egyáltalán nem volt képes az ortofotó legyártására.



24. ábra: A képek (kék téglalapok) körön történő tájolása a lejtőközépi lavaka esetén. (A képek optikai tengelyének irányát a fekete vonalak jelölik)

7.2.2. Hypr3D



25. ábra: 17 képből készített ortofotó. A felülnézeti képen látható, hogy a gerincmaradványok (kék görbe) takarásában lévő területek igen adathiányosak (piros nyilak). A modellt továbbá befolyásolta a lavaka dús növényzete és az ég (zöld nyilak).

Mivel a *Hypr3D* maximum 60 képet tud feldolgozni, ezért csak a lejtőközépi lavaka részletét próbáltam meg vele lemodellezni (25. ábra).

A lejtőlábi lavakával szemben itt már jóval több adathiányos vagy rosszul reprezentált terület jelentkezett a lavaka összetettségéből és magas árnyékoló falaiból adódóan. Ennek a lavakának, a növényzete is jóval dúsabb volt, magas fákkal és sok nagyobb bokorral, melyek ugyancsak komolyan befolyásolták a modell minőségét. Ez látható a 26. ábrán is, amelyen pirossal jelöltem a lavaka eredeti falát, késsel pedig a *Hypr3D* által lemodellezett falrészletet. Utóbbin fölül az ég és a növényzet, oldalt pedig egy fenyő zavaró hatása befolyásolja a modell minőségét.

Az adathiányból adódóan a gerincek között fekvő mélyebb területek is alulreprezentáltak voltak (25. ábra).



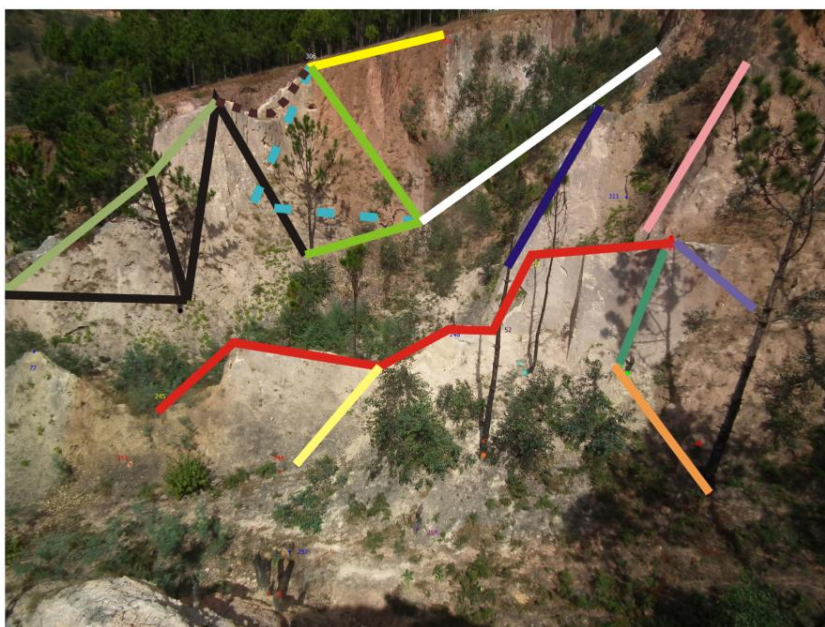
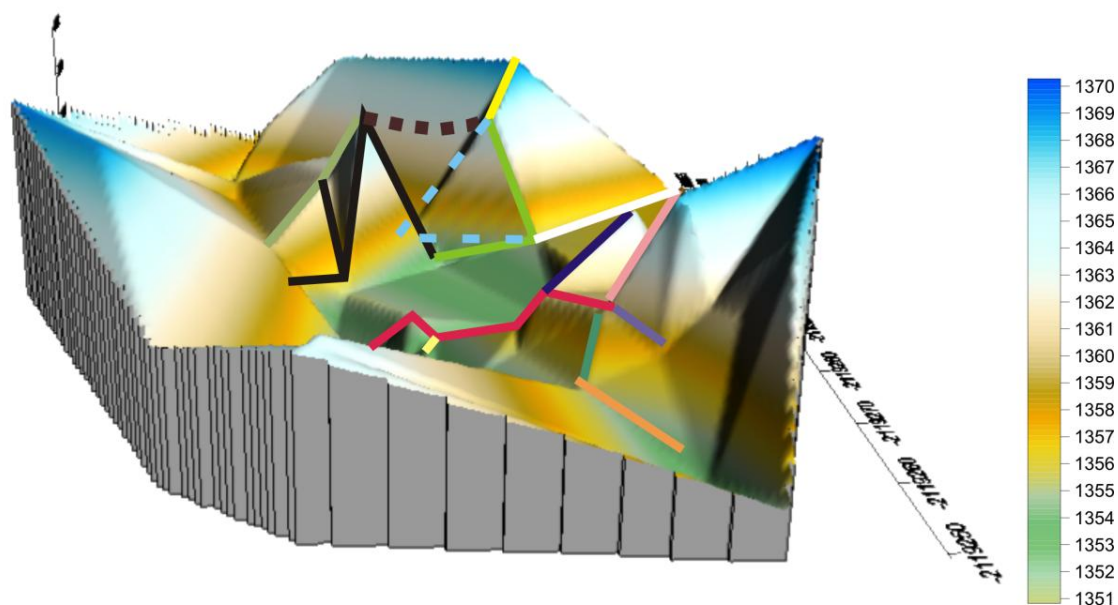
26. ábra: A modell hibái. Pirossal jelöltem a lavaka eredeti falát, késsel, pedig a növényzet és az ég hatására kialakult ettől eltérő modellezett falat.

7.2.3. A MATLAB forrásnyelvű félautomata modell eredményei

Ennek az eljárásnak legnagyobb hátránya az eddig bemutatott programokkal szemben, hogy a modellezéshez szükséges adatbázis előállítása igen időigényes (míg az automata

programok 1-2 óra alatt képesek több 10.000 pontot generálni, kézzel ugyanez a munka hónapokig tartana).

A kezdeti eredmények *Surfer*-beli megjelenítése és ennek hibái láthatóak a 27. ábrán.



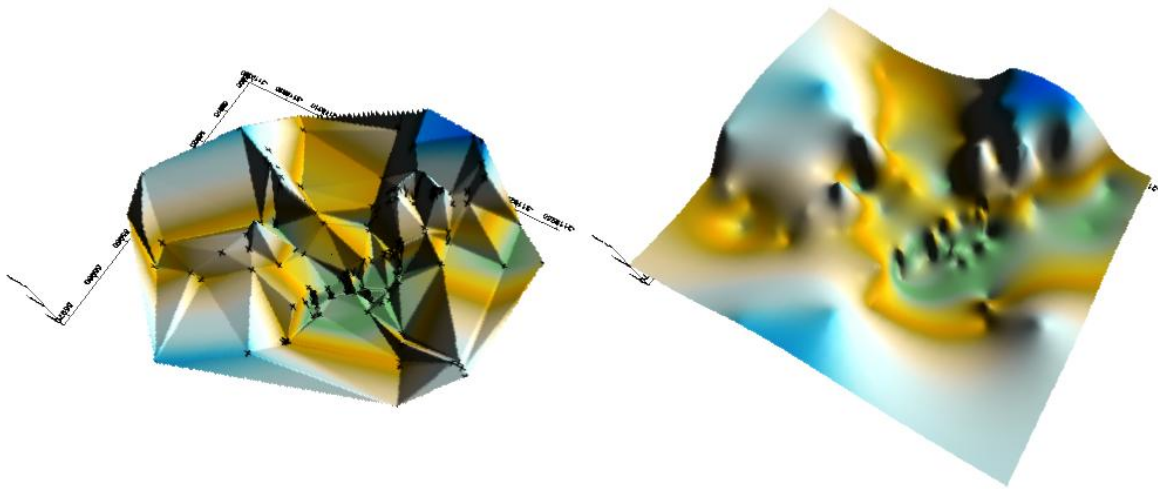
27. ábra: Felül a lejtőközépi lavaka egy részletének 3D modellje, a MATLAB-ban alkalmazott lokális koordináta rendszerben 62 pont alapján, melynek jobb oldalán a magasság skála látható (méterben).

Alul a 6926-os kép látható referenciaként. Az azonos színű vonalak a lavaka azonos éleit jelölik (a szaggatott vonalak a valóságnak nem megfelelően modellezett éleket jelölik).

Összehasonlítottam a kapott 3D modellt a 6926-os képpel annak bemutatására, milyen hibák léptek fel a 62 pontból készített modellnél. Vonalakkal jelöltem a program által

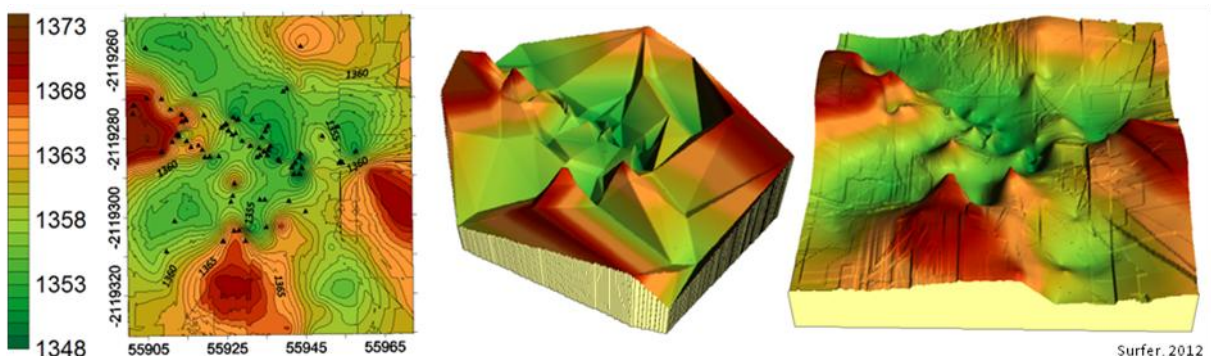
modellezett éleket, és ezek elhelyezkedését a képen. Egyes helyeken látszik, hogy a valósághoz képest pár 10 cm-rel elcsúsztak. A nagyobb hibákat a szaggatott vonalak jelzik, melyeknek a fényképeken nincs megfelelőjük, azaz ahol a modell eredmény nem felel meg valóságnak. Ennek oka lehet például az, hogy a megjelenítő szoftver vagy interpolációs eljárás tévesen párosított össze pontokat, vagy, hogy maguk a pontok azonosítása során lépett fel hiba (elírás, elcsúszás). A hibát okozhatta az is, hogy nincs megfelelő pontszám az adott területen.

Ennek a módszernek ugyanakkor előnye, hogy a generált modell a "végtelenségig" finomítható és javítható, így például a 28. és 29. ábrán egyre pontosabb modellek láthatóak.



28. ábra: A modell finomított verziója Surfer programmal megjelenítve.

A modell tovább finomított verziója látható a 29. ábrán, ahol a megjelenítést a lavakáknak megfelelő színskálával javítottam. A képek szépen visszaadják a lavaka belső alakját ott, ahol az őket meghatározó pontok sűrűsége és eloszlása megfelelő volt. Ez jellemző a peremekre és az aljzatra. A gerincmaradványok megjelenítése azonban korrigálásra szorul, mivel a síkokat illesztő módszer pontok hiányában a lavaka alján felvett képpontokhoz húzza a felszínt, mely ezáltal gerincek helyett kúpokat generál.



29. ábra: Tovább finomított és színskálával is ellátott szintvonalas térkép, TIN és 3D tömb szelvény modellek .

A félautomata modellnek előnye, hogy a GPS pontoknak köszönhetően valós földi koordinátákkal rendelkezik, és alkalmas bonyolultabb szerkezetek modellezésére is. A modell kimeneteként univerzálisan felhasználható térbeli koordinátákat és magasság adatokat tartalmazó adatsorokat kapunk, melyeknek az elemzése és megjelenítése sokkal tágabb skálán, komplexebben valósulhat meg. Hátránya azonban, hogy a fényképek, mint textúra hozzárendelése a modellhez további időigényes munkafeladat lenne, s ezáltal a megjelenítés kevésbé mutató módón valósítható meg. A korrigálás azonban nehézkes feladat, hiszen a modellezés ezen végső szakaszán már nem mindegy hová vesszük fel a további pontokat. Ilyenkor figyelembe kell vennünk a korábban felvett pontok eloszlását is.

8. Eredmények diszkussziója

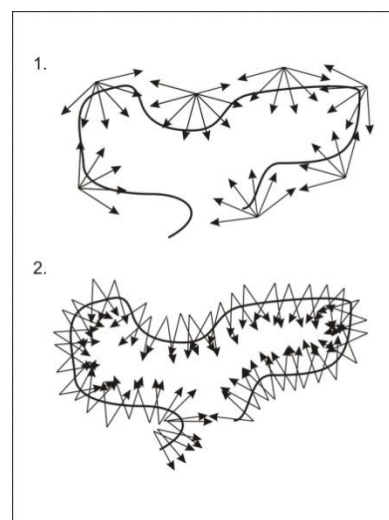
Összefoglalásképpen elmondhatom, hogy a mai nyílt hozzáférésű 3D-s képalkotó programok meglepően fejlettek, gyorsak és megfelelő adatbázissal, illetve terepi-geológiai mérésekkel kombinálva, alkalmasak az igen költséges felmérő módszerek (például lézerszkennelés) kiváltására egyszerűbb modellek esetén. A szoftverek nagy része nem képes feldolgozni a szerkesztett/vágott/javított képeket, ezért a terepen kell arra ügyelnünk, hogy megfelelő legyen a minőség illetve, hogy minél kevesebb felesleges információ kerüljön a képekre. Ezek javítására ugyanis a modellezés során már nem nagyon van lehetőség.

Ugyan az általam tesztelt programok mindenképpen tovább fejlesztésre szorulnak amennyiben bonyolultabb formák megjelenítésére és összetett elemzésére kívánjuk őket alkalmazni. Kisebb munkák, hobbi modellezések elvégzésére bármikor felhasználhatók. Próbálkozásaim során a Hypr3D programot találtam a leghasznosabbnak. Egy nyílt hozzáférésű programról van szó, mely könnyen, igen gyorsan és megbízhatóan dolgozik. A további modellezések során ezt egyfajta referenciának tekintem. Elsődleges célom azon területek lemodellezése, amelyek meghaladták ennek a programnak az alkalmazhatósági kereteit. A PhotoScan is igen jó programnak bizonyult, ára miatt azonban nem volt alkalmam kipróbálni a teljes körű verziót.

A terepi felmérést illetően bebizonyosodott, hogy jóval több képre és nagyobb átfedésre van szükség, hogy ezeknek a programoknak megfelelő bemeneti adatrendszerrel kapjunk. A tesztelés során gyakorlatilag minden programnál gondot okozott az adathiány, és mivel a programok többsége automatikusan illeszt, csupán a terepen jelentősen több időt több képet készíteni. A lejtőlábi lavaka esetén valószínűleg plusz egy napmérés megoldotta volna az adathiányos területek problémáját.

A modellezés során azt is tapasztaltam, hogy fontos, hogy a különböző képek különböző álláspontokból készüljenek, ezért a terepen használt mintavételt a 29. ábrán látható módon kell megváltoztatni.

Az interneten elérhető és általam tesztelt programok esetén az egyik legnagyobb előny egyben a legnagyobb hátránynak bizonyult. Az automata pontillesztésnél ugyanis általában



30. ábra: A terepen alkalmazott mintavétel (1.) és a későbbiekben alkalmazandó mintavétel (2.)

nincs mód a hibák javítására. A munka folyamata és az illesztett pontok nem láthatóak, és nem is javíthatók a legtöbb esetben.

Célom a félautomata modell megalkotásával ezeknek a hibáknak a kiküszöbölése volt, hiszen manuális képilllesztéssel dolgozva, a növényzet és az ég zavaró hatásai kiküszöbölhetőek. Előnye továbbá a félautomata modellnek, hogy georeferálható, és a terepen mért GPS koordináták hibája is javítható. Hátránya azonban hogy igen időigényes és ezáltal rosszabb felbontás érhető csak el vele. Egy automatikus modell több 10.000 pontot generál pár óra alatt, míg a manuális képilllesztés során több 100 pont generálása hetekbe telt.

A modellezés során nyilvánvalóvá vált, hogy a méréseknél használt felvételezési technika nem volt a legmegfelelőbb és a jövőben kisebb változtatásokra szorul amennyiben a terepek modellezését a hétköznapi fényképezőgéppel, a korábbiakban már bemutatott egyszerűen kezelhető szoftverekkel, vagy MATLAB-ben szerkesztett félautomata modellel szeretnénk elvégezni.

A georeferálás szempontjából fontos, hogy ne csak azoknak a pontoknak vegyük fel a koordinátáit, melyeken mértünk, hanem a terepen előre kijelölt várhatóan a képeken jól azonosítható pontokat is rögzítsünk, melyek koordinátáit felhasználva a georeferálás során egy megbízhatóbb és pontosabb eredményt kaphatunk. Egyes programok esetén elvárás, hogy a képek tartalmazzanak georeferált pontokat, ilyen például az Erdas LPS félautomata programja, melynél a modellezés kezdetén ezeket a georeferált pontokat kell manuálisan illeszteni.

A Garmin 60-as GPS-szel mért magasságok pontatlansága miatt felvetődött, hogy a későbbi méréseket érdemes lenne barométerrel ellátott „túra” GPS-szekkel végezni, és amennyiben MATLAB programmal végezzük a képek illesztését, mindenképpen fel kell venni nem csak az azimutszöget, de a fényképezőgép vízszinteshez képesti döntését is.

A mérést minden esetben egy terepbejárás kell, hogy megelőzze, annak felmérésére, melyik területtel érdemes/kell kezdeni. Fontos a napszaknak megfelelően végezni a mérést, azaz kihasználni a terep természetes megvilágítottságát, ügyelve az árnyékok napközbeni alakulására. Sajnos a legtöbb program nem tudja jól kezelni a vakuval készített képeket ezért ezt is kerülni kell.

9. Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, Molnár Gábornak a modellezésben nyújtott segítségét, illetve Székely Balázsnak, hogy felhívta a figyelmemet a témára és munkámat mindvégig támogatta.

Köszönöm továbbá Visnovitz Ferencnek és Kovács Gábornak a munka során biztosított segítségét, illetve Raveloson Johary Matthieunek és Rózsi Rolandnak a terepi méréseknél nyújtott segítséget.

Nem utolsó sorban köszönöm Zámolyi Andrásnak, Horváth Ferencnek és Szőnyi Juditnak, hogy segítettek munkámat értékes irodalmak felkutatásával és ajánlásával.

10. Irodalomjegyzék

Andriamampianina, N., 1985

Les lavaka malgaches: Leur dynamique erosive et leur stabilisation
Madagascar Revue de Géologie, Vol. 46

Andriamampianina, N., 2006

L'érosion en lavaka: Processus et utilisation par les paysans d'Ampasimbe, Madagascar
In: Roose, E. (ed.), *Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides*
AUF, EAC et IRD, Paris, pp. 256-261

Ashwal, L.D. & Tucker, R.D., 1999,

Geology of Madagascar: A brief outline
Gondwana Research, Vol. 2(3), pp. 335-339

Balázs D., 1983

Bozóttaxival Madagaszkáron
Világjárók sorozat, Gondolat, Budapest

Bakoariniaina, L.N., Kusky, T. & Raharimahefa, T., 2006

Disappearing Lake Alaotra: Monitoring catastrophic erosion, waterway silting, and land degradation hazards in Madagascar using landsat imagery
Journal of African Earth Sciences, Vol. 44, pp. 241-252

Burtch R., 2011

History of Photogrammetry
Center for Photogrammetric Training, p.1-36
<http://www.ferris.edu/faculty/burtchr/sure340/notes/history.pdf>

Cox, R., Rakotondrazafy, A.F.M. & Bakoariniaina, L.N., 2003

Geological controls on development of erosional gullies (lavaka), central Madagascar
(Abstract)
2003 Seattle Annual Meeting, Vol. 31-7

Cox, R., Rakotondrazafy, A.F.M. & Rakotondramazava, H.T., 2004

Geological versus human controls on lavaka formation and extreme erosion in Madagascar
(Abstract)
2004 GSA Denver Annual Meeting, Vol. 66-7

Cox, R., Bierman, P., Jungers, M.C. & Rakotondrazafy, A.F.M., 2009

Erosion rates and sediment sources in Madagascar inferred from ¹⁰Be Analysis of lavaka, slope, river sediment.
The Journal of Geology, Vol. 117, pp. 363-376

Cox, R., Zentner, D.B., Rakotondrazafy, A.F.M. & Rasoazanamparany, C.F., 2010

Shakedown in Madagascar: Occurrence of lavakas (erosional gullies) associated with seismic activity
Geology, Vol. 38(2), pp. 179-182

Czímber K., 2001

Geoinformatika (Elektronikus jegyzet)

<http://www.geo.u-szeged.hu/~joe/fotogrammetria/GeoInfo/index.htm>, 2011

EStandards Forum, 2009

Country Brief, Madagascar 2009

www.estandardsforum.org, pp. 1-26

Gaudie A. & Boardman J., 2010

Soil Erosion,

In: Alcantara-Ayala I. & Gaudie A. (ed.) *Geomorphological hazards and disaster prevention*
Cambridge, pp. 177-185

Geography, 2011

<http://geography.about.com/library/cia/blcmadagascar.htm>

Google Earth, 2011

<http://www.google.com/earth/index.html>

Mélykúti, G., 2004

Fotogrammetria (Segédlet a BME Építőmérnöki Kar hallgatói részére)

http://www.fmt.bme.hu/fmt/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEEOFTAG12,
2011, Budapest Műszaki Egyetem

Metricon, 2011

<http://www.metricon.hu/>, 2011

ONE (Office National pour l'Environnement), 2011

<http://www.pnae.mg/>

**Rasaminana, N., Ravaka, A., Razafindrakato, C., Razafinimaro, N.C.R.,
Razanadrakoto, S. & Razanakotonarivo, T.O., 2007**

Les lavaka (Exposé de géologie)

Razanatseheny, M. M.O., Rakotondrazafy, A.F.M. & Ronadh, C., 2010

Investigating Lavaka (gully) erosion in Madagascar: lithologic controls

2010 GSA Denver Annual Meeting, Vol. 171-6

Riquier, J., 1954

Étude sur les "lavaka"

Mémoires de l'Institut Scientifique de Madagascar, Vol. D(VI.), pp. 169-189

Szatmári, J. 2002

Digitális fotogrammetria segédanyag

http://www.geo.u-szeged.hu/~joe/fotogrammetria/Fotogrammetria_jegyzet.pdf, 2011

Zavada, M.S., Wang, Y., Rambolomanana, G., Raveloson, A. & Razanatsoa, H., 2009

The significance of human induced and natural erosion features (lavakas) on the central highlands of Madagascar

Madagascar Conservation and Development, Vol. 4(2), pp. 120-126

Wells, N.A., Benjamin, A. & H.F. Solo, R., 1991

Patterns of development of lavaka, Madagascar's unusual gullies
Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 16(3), pp. 189-206

Wells, N.A. & Andriamihaja, B., 1993

The initiation and growth of gullies in Madagascar: Are human to blame?
Geomorphology, Vol. 8(1), pp. 1-46