

Industria Teknologiaren Ingeniaritzako Gradua

GRADU AMAIERAKO LANA

3D HISTOLOGIA, RGB-TIK 3D-RA: 3D INPRESIO BIDEZKO HISTOLOGIA OBJEKTU BATEN SORKUNTZA

MEMORIA

Ikaslea: Mantxola Akizu, Asier

Zuzendaria: Eguirraun Martinez, Harkaitz

Ikasturtea: 2018-2019

Data: Bilbo, 2019ko Ekainak 24

Laburpena:

Informazio kantitate handiak transmititzeko duten gaitasuna dela eta, irudiek izugarriko garrantzia dute zientzia zein hezkuntza munduan. Teknologia berrien garapenarekin urtetik urtera handituz doa grafikoek, diagraemek, argazkiek edota maketek gaur egungo gizartean duten garrantzia. Ondorioz, ikusmen arazoak dituzten pertsonen informazioa eskuratzeko geroz eta arazo gehiago dituzte. Lan honetan metodologia bat garatu da non histologiako 5 irudi aztertu, prozesatu eta 3D inprimaketarako artxibo gisa moldatuko diren.

Hitz gakoak: Histologia, 3D inprimaketa, irudi prosezaketa, MatLab, STL, ikusmen urritasuna.

Resumen:

Las imágenes siempre han sido importantes en el ámbito científico-educativo, por su capacidad para transmitir grandes cantidades de información. Cada año se incrementa el peso de los gráficos, diagramas, fotografías o maquetas en este campo. Por lo tanto, las personas con alguna discapacidad visual tienen cada vez más problemas para acceder a dicha información. En este trabajo se desarrolla una metodología para analizar, procesar y crear 5 archivos de impresión 3D correspondientes a 5 imágenes del ámbito de la histología.

Palabras clave: Histología, impresión 3D, procesamiento de imagen, MatLab, STL, discapacidad visual.

Abstract:

Due to their ability to transmit large amount of information, images have always been important in the scientific-educational field. The use of graphics, diagrams, photographs or models in these fields is increasing. Therefore, people with visual impairment have more problems while accessing this kind of information. In this work, a methodology for analyze, process and create a 3D printing archive from 5 histology images is carried out.

Key words: Histology, 3D printing, image processing, MatLab, STL, visual impairment.

AURKIBIDEA

1. SARRERA.....	9
2. TESTUINGURUA	10
2.1 Histologiarako aplikagarritasuna.....	11
2.2 Ikergaiaren aurretiko egoera.....	11
2.3 STL artxiboen erabilpena 3D inprimaketan	13
3. LANAREN HELBURUA ETA IRISMENA.....	14
4. METODOLOGIA	15
4.1 STL formatuko artxiboa sortu. MatLab	16
4.2 STL artxiboa modifikatu. MeshLab	23
4.3 STL ezberdinen arteko konparaketa. GOM Inspect.....	27
4.4 Objektua sortu 3D Inprimagailuarekin.	31
5. APLIKAZIOA KASU PARTIKULAR BATEN	32
6. EMAITZAK.....	34
7. BALIABIDEAK	37
7.1 Histologiako argazkiak.....	37
7.2 Erabilitako programak	38
7.3 3D inprimagailua	38
8. LANAREN PLANIFIKAZIOA.	39
8.1 Eginkizun eta betebeharren deskribapena	39
8.2 GANTT diagrama	41
9. LIMITAZIO ETA OZTOPOAK.....	42
10. ONDORIOAK ETA ETORKIZUNEKO LANA.....	43
10.1 Ondorioak.....	43
10.2 Etorkizuneko ekarpena. Aplikagarritasuna.	44
11. ALDERDI EKONOMIKOAK	45
12. BIBLIOGRAFIA	46

IRUDIEN AURKIBIDEA

- 2.1 Irudia.** Greg J. Williams (2014) laneko prozesuaren fluxu diagrama
- 2.2 Irudia.** Toru bat STL eta CAD motako artxibo gisa
- 4.1 Irudia.** Metodologiaren eskema orokorra
- 4.2 Irudia.** RGB iruditik STL artxiboa sortzeko prozesuaren eskema
- 4.3 Irudia.** RGB aldagaitik B/W aldagaira
- 4.4 Irudia.** RGB, Gris eskala eta Gris eskala kontrastea handituta irudiak
- 4.5 Irudia.** Meshgrid funtzioak sortzen dituen X eta Y matrizeak, 10x10 kasua
- 4.6 Irudia.** Meshgrid eta Stlwrite erreferentzia sistemak
- 4.7 Irudia.** Y matrize berria Flipud aplikatu eta gero
- 4.8 Irudia.** Pixelaren intentsitate eta gris tonuaren erlazioa
- 4.9 Irudia.** Beltza 0- Zuria 255 hasierako disposizioa
- 4.10 Irudia.** Zuria 0- Beltza 255 bukaerako disposizioa
- 4.11 Irudia.** Bukaerako Z matrizea
- 4.12 Irudia.** MatLab programatik lortu den STL artxiboa MeshLab-en ikusita
- 4.13 Irudia.** Irudi2 STL artxiboa Laplacian Smooth filtroarekin
- 4.14 Irudia.** Laplacian Smoothing filtroaren aplikazio zehaztasunak eta parametroak
- 4.15 Irudia.** Irudi2 STL artxiboa Two steps filtroarekin
- 4.16 Irudia.** Two steps filtroaren aplikazio zehaztasunak eta parametroak
- 4.17 Irudia.** Irudi2 STL artxiboa Taubin filtroarekin
- 4.18 Irudia.** Taubin filtroaren aplikazio zehaztasun eta parametroak
- 4.19 Irudia.** Irudi 2 STL-a Laplacian smooth filtroarekin eta dagokion histograma
- 4.20 Irudia.** Irudi 2 STL-a Two Steps filtroarekin eta dagokion histograma
- 4.21 Irudia.** Irudi 2 STL-a Taubin smooth filtroarekin eta dagokion histograma
- 4.22 Irudia.** MeshLab eta GOM Inspect programetan burututako prozesuen Fluxograma
- 5.1 Irudia.** RGB iruditik 3D objekturako prozesua
- 6.1 Irudia.** RGB eta STL Irudi 5
- 6.2 Irudia.** Bukaerako objektu inprimatua Irudi 5
- 6.3 Irudia.** Irudi 1 hasierako RGB eta lortutako STL formatuetan
- 6.4 Irudia.** Irudi 2 hasierako RGB eta lortutako STL formatuetan

6.5 Irudia. Irudi 3 hasierako RGB eta lortutako STL formatuetan

6.6 Irudia. Irudi 4 hasierako RGB eta lortutako STL formatuetan

7.1 Irudia. Erabilitako histologiako 5 irudiak

8.1 Irudia. Gantt diagrama

10.1 Irudia. Mendi-lerro baten 3D objektua

TAULEN AURKIBIDEA

7.1. Taula. Histologiako 5 irudien ezaugarriak

11.1 Taula. Lanaren aurrekontua

1. SARRERA

XXI. mendeko gizartean, teknologia berriek duten pisua izugarri handitzen ari da urtetik urtera. Pantailadun gailuekiko (ordenagailu, tablet, smartphone...) mendekotasuna nabarmena da, eta honek zenbait arazo suposa ditzake. Izan ere, gizakion 5 zentzumenetatik ikusmena ia beharrezkoa den ahalmena bihurtu da. Medikuntzan eta biologian, histologiaren arloan esate baterako, mikroskopio elektronikoen erabilera ezinbesteko bilakatu da, ehun organikoen azterketak laginak bisualizatuz egiten baitira mikroskopio hauen bidez. Beraz, agerian daude gaur egun pertsona itsu edo ikusmen urritasuna daukatenak dituzten arazoak eta informazioa eskuratzeko limitazioak.

Bestalde, teknologia berrien garapen etengabeak baditu alderdi onak; izan ere, 3D inprimagailuen kostua nabarmenki murriztuz doa urtetik urtera. Honek irudi taktilekiko interesa handitzea suposatu du, 3 dimentsioko modeloak sortzea inoiz baino eskuragarriagoa baita. Grafika taktil hauen aplikagarritasuna izugarria da, zientziako edozein arlotan erabili daitezkelarik.

Lan honen bitartez histologia arloan ikusmen arazodun pertsonak dituzten mugak murriztu nahi dira, ukipenaren bidez informazioa lortzeko modu bat garatuz. Horretarako, histologiako laginaren eskaneaketaren bidez lortutako 2Dko koloredun irudia ukipenaren bidez irakurtzeko 3Dko objektu bilakatuko da. Hau, RGB irudi bat STL (stereolithography) formatuko artxibo baten bilakatuz, eta inprimagarria den artxiboa sortuz egingo da. Objektuari filtro eta eragiketa ezberdinak aplikatu eta hauen artean ukipenaren bidezko irakurketa erraztu eta egokiena egiten dutenen artean ere aukeraketa bat egingo da, prozesu guztiaren metodologia bat ezarriz.

Lan honek hainbat puntu jorratuko ditu 3Dko objektu inprimagarria lortzeko prozesuaren metodologia garatzeko orduan. Hain zuzen, gaiaren testuinguruaren identifikazioa, lanaren helburu eta irispena, lanaren metodologia eta nola garatu den, metodoa kasu partikular batean aplikatzeko jarraitu beharreko prozesua, erabilitako baliabideen azalpena, garapenean agertutako oztopoak, erabilitako metodologiaren ondorioz lortutako emaitzak eta ondorioak, lana garatzeko alderdi ekonomikoa eta etorkizuneko aplikagarritasuna jorratuko ditu, besteak beste.

2. TESTUINGURUA

"Ezintasunari, Autonomia Pertsonalari eta Mendetasun Egoerei buruzko Inkesta" (Encuesta sobre Discapacidad, Autonomía Personal y Situaciones de Dependencia, 2008) kontuan hartzen badugu, Estatistikako Institutu Nazionalak (INE) eginiko galdeketa honen arabera, Espainia mailan 6 urtetik gorako 979.200 pertsonen ezgaitasun bisual motaren bat jasaten dute, zeinetatik 920.900 ikusmen baxua duten pertsonak diren, eta 58.300 guztiz itsuak diren. Honek estatu mailan ikusmen ezgaitasunen bat biztanleriaren %2,14ak jasaten duela esan nahi du. Gaur egungo gizartean nabarmena den osasun arazoa dela ondorioztatu daiteke, urtetik urtera handitzen doana, biztanleriaren batzbesteko adinaren hazkuntza edota diabetes kasuen handitzea faktore nagusiak direlarik, besteak beste.

Mende luzez, itsutasuna duten pertsonen mugatua izan dute informazioarako eta hezkuntzarako irisgarritasuna. Lehenbizi, irakurle, kopista eta ahozko kontakizunetan oinarritu ziren, informazioa eskuratzeko beste pertsonetikiko mendekotasuna zutelarik. Pasa den mendean, ordea, Braille sistemak irakurketan nolabaiteko autonomia eman zien. Gaur egun asko dira itsu edo ikusmen urritasuna duten pertsonentzako informazioa errazteko garatutako bideak, ukipenaren bidezkoa, adibidez, erabilitariko da.

Zientzia munduan ikusmenaren bidez jasotako informazioa ukipenaren bidez irakur daitekeen moduan errepresentatzea ez da azken urteetako gauza. Dr. Jacob Bolotin izeneko fisikari itsua hogeigarren mende hasieran medikuntzan aplikagarriak izan ziren zenbait organoen disezioen modeloak egiten aitzindaria izan zen (Perlman, R. , 2007). Buztinez egindako modelo bakoitza egiteko denpora luzea zen eta prozesua konplikatu. 2019. urtean, ordea, teknologiak eskaintzen dituen aukerak mugagabeak dira eta duela mende bat pentsaezina gerta zitekeena, eskuragarria da gaur egungo tresneriarekin. Orain arte gutxi ikertutako eta erabilitako mundua dela esan daiteke 3 dimentsioko inprimagailuena, hauen kostu handia eta materialaren beraren prezio altua dela eta. Dena den, azkenengo urteetan teknologia honen kostua nabarmenki gutxitu da, merkatuko erabiltzaile askorentzat eskuragarri egin delarik. Honek zenbait aukera zabaltzen ditu zientziaren arloan eta "2.5 dimentsioko" irudien erabilera aukeretako bat dela esan daiteke. 2Dko irudietatik abiatuz, irudiaren pixelei altuera emateko prozesuan sortzen diren objektuei esaten zaie 2.5 dimentsioko modeloak. Proiektu honetan kolorezko 2D irudi batetik abiatuta, irudiaren prozesaketa burutu, irudiari altuera eman eta 3Dko modelo taktil bat sortzea izango da helburua.

Jakina da ikusmenak ukipenak baino informazio dexente gehiago interpretatu dezakela. Ondorioz, 2D iruditik sortzen den modelo taktikal ezingo du eskaini irudiaren informazio guztia. Beraz, zein informazio den garrantzitsua eta ezinbestekoa eta zein arbuigarria erabaki beharko da. Honek prozesuaren zailtasuna islatzen du, ez baita errea koloredun irudi baten informazioa 3Dko modelo baten sinplifikatzea. Irudiaren tamaina, reeskalaketa, zimurtasuna, aplikatu beharreko kontrastea... asko dira kontuan hartu beharreko ezaugarriak. Ondorioz, ahalik eta informazio erabilgarriena bildu eta ukipenaren bidezko irakurketa erraztea ahalbidetzen duen prozesuaren metodologia burutuko da lan honetan, histologiarako aplikagarritasunean espezifikatuz.

2.1 Histologiarako aplikagarritasuna

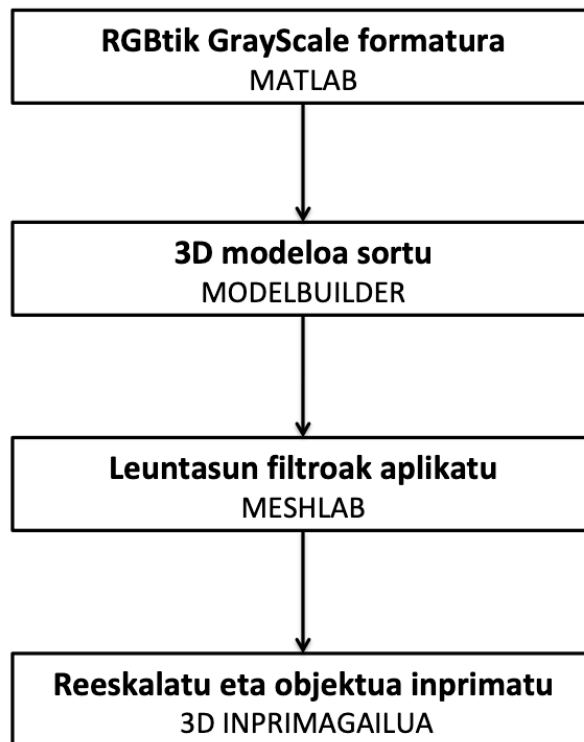
Garatutako proiektua biologia zelularreko arloan bereziki aplikagarritzat jo daiteke. Mikroskopiaren bidezko irakurketak eta laginen eskaneatzeak dira oinarri zientziaren eremu honetan, eta ondorioz, ikusmenaren erabilerak garrantzi eta pisu handia dauka. Zehatzagoak izateko, biologia zelularren histologiako disziplinan zentratzen da lanaren aplikagarritasuna. Histologia animalia eta landareen ehunen azterketaz arduratzen den zientzia da. Ehun organiko hauen egitura, garapena eta funtzioak aztertzen dira besteak beste. Guzti hau ehunen beaketarako tresna optikoen laguntzarekin burutzen da, aipatutako mikroskopia elektronikoaren laguntzarekin, adibidez. Lan honetan UPV/EHUko Zoologia eta Animalia Zelulen Biologia sailak eta Plentziako Itsas Estazioak eskainitako histologiako 5 irudi ezberdin aztertu eta garatuko dira, disziplina honetako beste irudi batzuentzako aplikagarria izango den metodologia bat garatuz.

2.2 Ikergaiaren aurretiko egoera

Garatutako lanaren oinarritzat 2014. Urtean RESNA (*Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America*) elkarteak egindako konferentzian aurkeztutako proiektu bat hartu da. Purdue eta Arizona State unibertsitateen eskutik *3D Printing Tactile Graphics For The Blind: Application To Histology* izeneko lana aurkeztu zen bertan. (Greg J. Williams, 2014).

RESNAko konferentzian aurkeztutako lanean jarraitzen den prozedura hurrengoa da: 2Dko RGB irudia GrayScale (B/W) formatura pasatzen da MatLab

bitartez, *rgb2gray* izeneko funtzio bakarra erabiliz. 3Dko moldea ModelBuilder liburutegia (Watz, M. 2011) erabiliz sortzen da. Jarrain, MeshLab programa erabiltzen da 3D objektua editatzeko eta leuntasun filtroak aplikatzeko. Bukatzeko, MakerWare software-a eta Replicator 2X inprimagailua erabiliz, MakerBot enpresarena, tamainaren reeskalaketa eta objektuaren inprimaketa burutzen da.



2.1 Irudia. Greg J. Williams (2014) laneko prozesuaren fluxu diagrama

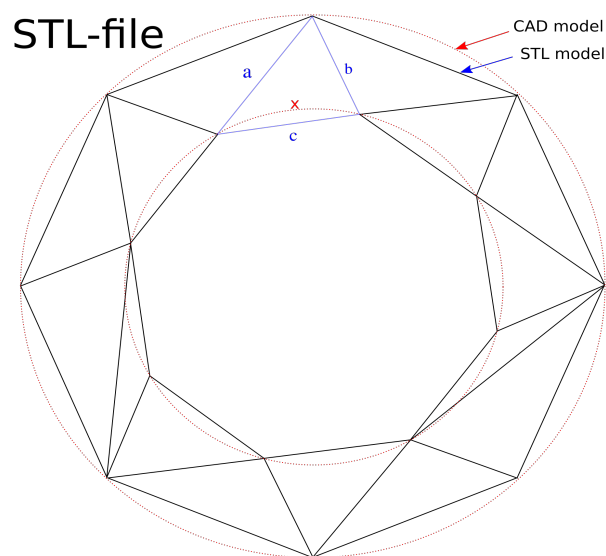
Lanaren ondorioetan, 3D grafikak aurretikako informazio gabe, ukipen hutsez lehendabizi irakurtzean edukitako zailtasunak azpimarratzen dira. Irudiaren eskalaren aukeraketa ere eztabaidatzen da, baita MeshLaben bitartez aplikatutako filtroaren iterazio kopuruaren egokitasuna ere. Zimurtasun puntu egokia lortzearen garrantzia aipatzen da, ukipenaren irakurketa ahalbidetzen duena baina taktorako atsegina dena lortzearen garrantzia, hain zuzen ere. Proiektuaren gaia lan honetan oinarrituta badago ere, garatutako metodologia oso ezberdina izango da.

2.3 STL artxiboen erabilpena 3D inprimaketan

Garatutako metodologian, 3D inprimagailuak objektua sortzeko irakurriko duen artxiboaren formatua STL-a izango da. STL (stereolithography) formatua 3D Systems enpresak sortu zuen, prototipatu azkarreko industrian eta ordenagailuz lagundutako fabrikazio sistemetan erabiltzeko (TJ McCue , 2019). Bereziki, 2011-2012 urteaz geroztik, plastiko termofusiblearen estrusio bidezko 3Dko inprimagailuen merkatuan agertzen da STL formatua, makina horien kontrolerako software ia guztietan erabiltzen delarik.

STL motako artxiboek 3Dko objektu ereduaren informazioa kodetzen dute. Hori Tessellation edo gaztelerazko “mosaiko” prozesuaren bidez egiten da. Prozesu honetan, objektuaren azalera forma geometriko batean edo gehiagotan zatitzen da, haien artean tarterik geratzen ez delarik. Prozesu hori batez ere forma triangeluarreko geometriekin burutzen da. Objektuaren azalera beraz, triangeluen bertize eta bektore normalen bidez deskribatzen da STL motako artxiboetan.

Nahiz eta beste CAD modelo batzuekin alderatuz zenbait informazio (koloreak, texturak...) mespretxatzen duen formatua izan, garatutako lanerako egokia da, objektuak ez baitauka alde batera utzitako ezaugarri horien beharrik ukipenaren bidez irakurri ahal izateko, garatutako metodologian 3D-ko objektuaren sorkuntza irudiaren intentsitatean oinarritzen baita.



2.2 Irudia. Toru bat STL eta CAD motako artxibo gisa.
Wikipedia STL File format (2019)

Gainera, burututako lanean oso erabilgarria izango da artxibo formatu hau, erabiltzen diren programa guztiek artxibo mota honen irakurketa onartzen baitute, baita objektua inprimatuko duen inprimagailuak ere.

3. LANAREN HELBURUA ETA IRISMENA

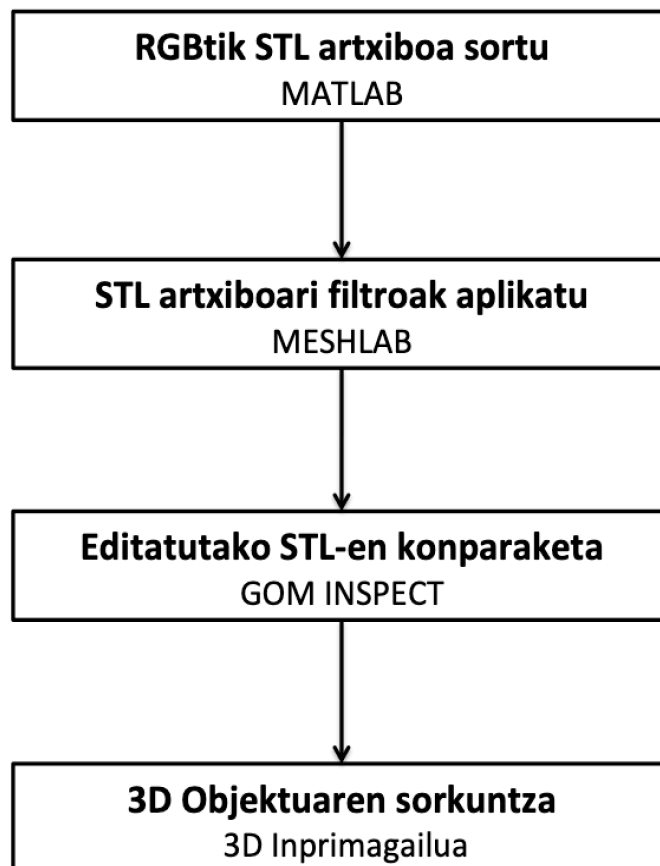
Lanaren helburua histologiarako aplikagarria den 2Dko irudien prozesaketan eta STL formatuko artxiboen sorkuntzan oinarrituz, 3D objektuen inprimaketa burutzea da.

Honetarako, zenbait bigarren mailako helburu ere finkatu dira:

- RGBtik abiatuz gris eskalako irudira bitarteko pausuak zehaztea.
- MatLab programaren bidez STL formatuko artxiboen sorkuntzarako metodologia eta garatutako script-a azalduko da.
- Sortutako STL-a inprimagarria eta ukipenaren bidezko irakurketarako egokia izan dadin behar dituen filtroen aplikazioa zehaztuko da.
- STL artxiboari aplikatutako filtro ezberdinen artean konparaketa bat egitea eta hauetatik egokiena aukeratzea.
- 3D inprimagailuaren bitartez, lortutako STL artxiboaren inprimaketa burutzea.

4. METODOLOGIA

Jarraian, 2Dko kolorezko irudi batetik abiatuta inprimagarria den eta ukipenaren bidezko irakurketarako ezaugarri egokiak dituen 3Dko artxibo bat sortzeko beharrezkoa den metodologia azalduko da. Pausoz pauso egindakoa azalduko da, burututako guztia teorikoki azalduz. 4.1 Irudian ikusi daitekeen bezela, prozesua lau atal ezberdinetan banatzen da: STL artxiboaren sorkuntza RGB iruditik abiatuta, MatLab (R2016b 9.1.0 bertsioa) programaren bidez, STL artxiboaren egokitzea eta editatzea filtroak aplikatuz, MeshLab (VCG-ISTI-CNR bertsioa) programarekin, filtro bakoitzaren emaitzaren analisia eta konparazioa GOM Inspect (GOM Inspect 2018 bertsioa) programaren laguntzarekin eta bukatzeko lortutako artxiboaren inprimaketa, 3D inprimagailuaren (Dimension Elite) bidez egiten dena, hain zuzen ere.

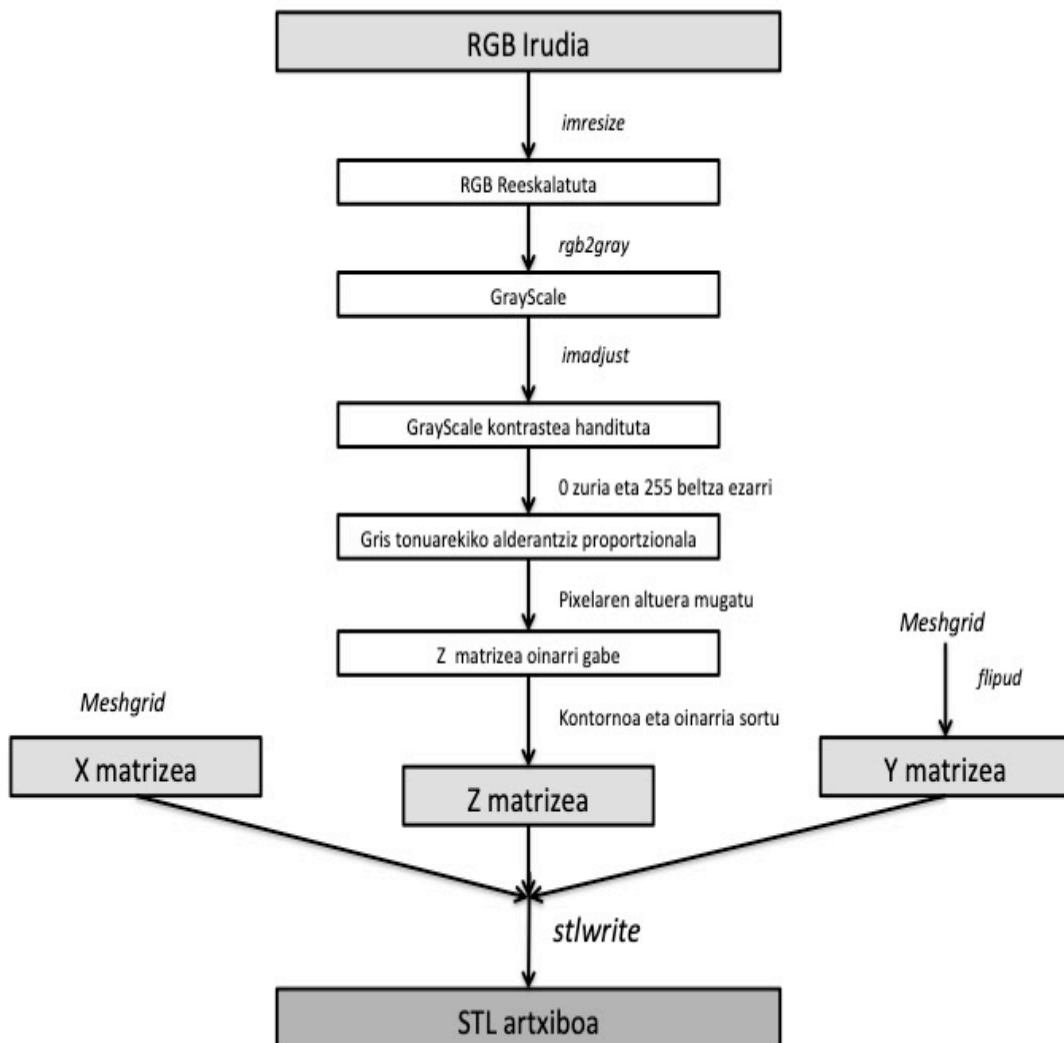


4.1 Irudia. Metodologiaren eskema orokorra

4.1 STL formatuko artxiboa sortu. MatLab

MatLab programaren bitartez, RGB motako irudia irakurri eta STL motako artxiboa sortzen duen script-a idatzi da. Jarraian sortutako *RGBtikSTLra.m* izeneko script-ak (zein ERANSKINAK dokumentuan atxikita dagoen) jarraitzen duen metodologia azalduko da. Metodologia honen azalpenerako, aztertutako histologiako 5 irudietatik IRUDI 2 (ezaugarriak 5.1 *Histologiako argazkiak* atalean aurkezten dira) izenekoari prozesua aplikatzean lortutako emaitzen irudiak erabiliko dira.

MatLab-eko prozesuaren azalpena errazteko asmoz, prozedimendu osoaren eskema bat erakusten da 4.2 Irudian, non emandako pausu guztiak adierazten diren.



4.2 Irudia. RGB iruditik STL artxiboa sortzeko prozesuaren eskema

5. *Aplikazioa kasu partikular batean* atalean azalduko den bezela, *RGBtikSTLra.m* script-a exekutatu aurretik erabiltzaileak zenbait informazio erraztu beharko du, inportatu nahi den irudia eta sortu nahi den STL artxiboaren izena, besteak beste. Behin informazio hau eskuratuta, aztertu nahi den irudi originalaren prozesaketa hasi daiteke script-aren exekuzioarekin.

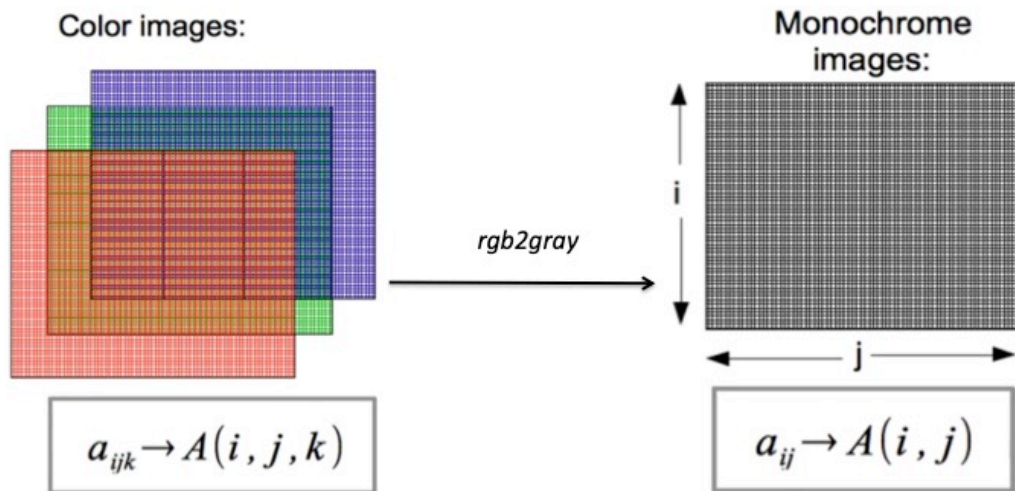
Lehenengo pausua, irudiaren **re eskalaketa** bat egitea izango da, inprimatzeko posible den tamaina batera egokituz, alegia. Script honek irudiaren zutabe kopurua 200 pixeletara mugatzen du, eta hilara kopurua hasierako irudiaren proportzia mantenduz ezarri. Beraz, 1920x2560 resoluzioko irudia, adibidez, 150x200ra mugatuko da *imresize* funtzioaren bitartez. Garatutako metodologian pixelen eta milimetroen arteko erlazioa zuzena da. Hau da, pixel bat mm bat da burututako prozesaketan. Garrantzitsua da beraz hasierako tamaina moldaketa hau egitea, batez ere prozesatu nahi den irudia resoluzio handikoa bada.

Jarraian, reeskalatutako **RGB irudia GrayScale** delako formatura eraldatuko da, gris eskala edo B/W izeneko formatura, alegia. MatLab (Matrix Laboratory-ren laburdura), izenak esaten duen bezela, matrizeetan oinarritzen den programa da, eta irakurtzen den lehen irudia, RGB irudia hain zuzen, 3 matrizez osatutako aldagaia izango da, Red, Green eta Blue matrizeak, hurrenez hurren. Izan ere, irudia osatzen duten pixel bakoitzeko kolore ezberdinak bere kolore primarioetan egongo dira deskonposatuta.

3 matrizezako pixel bakoitzak 0tik 255rako balioa izango du (pixel bakoitzak 8 bit-eko informazioa izango baitu). Tarteko zenbakiak kolore primario bakoitzaren tonalitate ezberdinen progresioa adierazten dute. 3 matrize hauetako kolore primarioen intentsitateen konbinaketa bitartez lortzen da inportatu dugun 2 dimentsioko koloredun irudia.

Orain, ordea, gris eskalako irudia lortzeko, 3 matrize horiek bakar batean murriztu behar dira 4.3 Irudian agertzen den bezela. Horretarako, Matlab-ek barneratuta daukan *rgb2gray* funtzioa erabiliko da. Funtzio honek matrize bakoitzeko pixelen balioen batuketa aritmetiko baten bitartez, 3 matrizeak bakar baten bihurtzen ditu. Matlabek *rgb2gray* funtzioan erabiltzen duen batuketa :

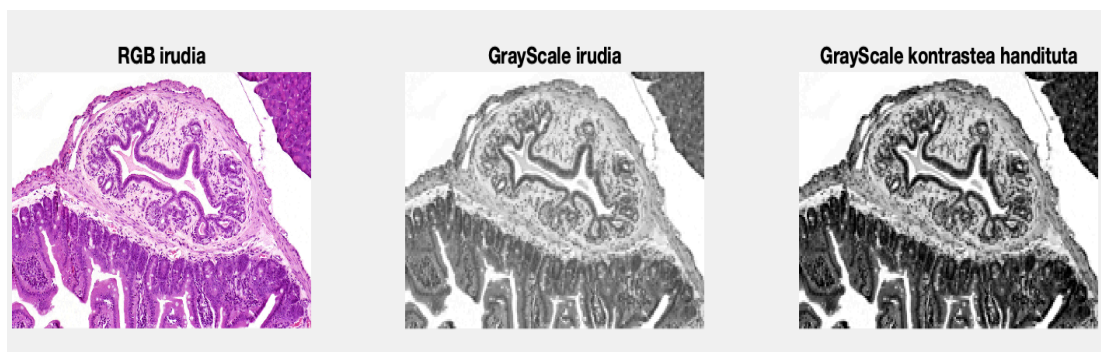
$$\text{Gray} = 0,2989 * R + 0,5870 * G + 0,1140 * B$$



4.3 Irudia: RGB aldagaitik B/W aldagaira. 3 matrizeak bakarreen bilakatu.

Lortutako aldagai berria 3 matrize izan beharrean matrize bakarra da, pixel bakoitzeko balioa 0-255 tartekoa duenak. 0 balioa, informazio eza, beltz kolorea da defektuz. 255 balioa, ordea, kolore zuria da. Tarteko balioak beltzetik zurirako gris tonalitate ezberdinak dira.

Ukipen grafikoak interpretatzeko orduan, irakurketa mota honek dituen limitazioak direla eta, zenbait zailtasun egon daitezke irudiaren azterketa egoki bat egiteko. Irudiaren koloreak oso planoak badira eta ez badago kontraste handirik, oso zaila izan daiteke ukipenarekin lerro, figura edota hutsuneak desberdintzea. Ondorioz, Matlab-en *imadjust* funtzioaren bitartez gris eskalan dagoen irudiaren **kontrastea** handitzen da. Funtzio honek pixel guztien %1 txikiena eta %1 altuena saturatzen ditu, irudiaren kontrastea handituz.



4.4 Irudia. RGB, Gris eskala eta Gris eskala kontrastea handituta irudiak

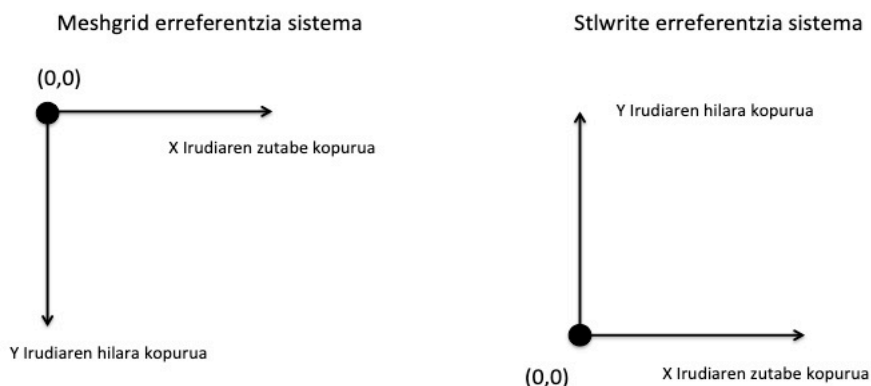
STL motako artxiboa sortzeko, MathWorks File Exchange plataforman eskuragarri dagoen *stlwrite* (Sven Holcombe, 2011) funtzioa erabiliko da, zein anexo bezela atxikita dagoen ERANSKINAK dokumentuan. Funtzio honen sarrera aldagaiak 3 matrize izango dira: X , Y eta Z (hirurak ere prozesatu nahi den irudiaren tamaina dutelarik). X eta Y matrizeak espazioko puntu ezberdinen koordinatuak zehazteko erabiltzen dira, eta Z matrizea koordinatuek adierazten duten espazioko puntu horretako pixelak daukan intentsitate balioa adierazten du, irudiaren altuera izango dena, hain zuzen ere.

Stlwrite delako funtzioa erabili ahal izateko, zenbait egokitzapen egin behar dira matrize hauetan. Hasteko, **X eta Y matrizeak** *meshgrid* funtzioaren bitartez sortuko dira. Funtzio honek bektore batetik abiatuz kuadríkula koordinatuak dituen matrizeak sortzen ditu. Horrela, Z matrizeko altuera bakoitzerako espazioko puntu bat edukiko dugu, hau da, pixela espazioan kokatzen dela esan daiteke. 4.5 Irudian erakusten da prozesatutako irudia 10x10eko izango balitz *meshgrid*-ek sortuko lituzken X eta Y matrizeak.

X										Y										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

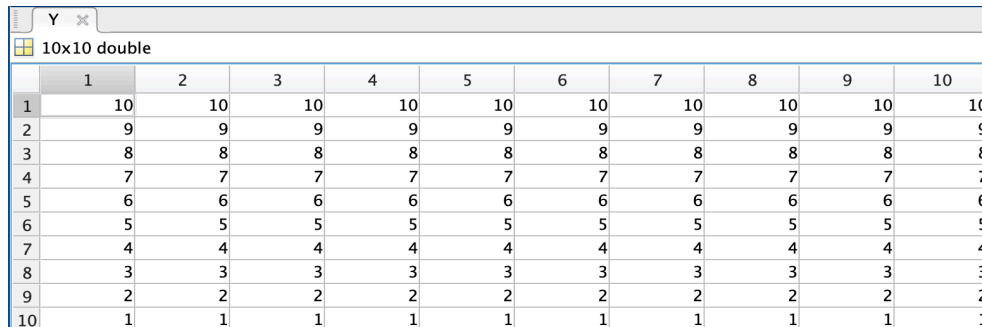
4.5 Irudia. Meshgrid funtzioak sortzen dituen X eta Y matrizeak, 10x10 kasua

Meshgrid funtzioak koordinatuen jatorria goitik hasita jartzen du, eta hortik behera sortzen ditu hilarak eta zutabeak. *stlwrite* funtzioak, ordea, datuak behetik hasita irakurtzen ditu. Erreferentzia sistema ezberdinak 4.6 Irudian erakusten dira.



4.6 Irudia. Meshgrid eta Stlwrite erreferentzia sistemak. Jatorri ezberdina ikusgai

Ondorioz, beharrezkoa da Y matrizea editatzea, bi matrizeen koordinatuen jatorria bera izan dadin. Nahikoa da Y matrizea ardatz horizontalarekiko iraultzea, honekin arazoa konponduz. Eragiketa hau MatLabeko *flipud* funtzioarekin egiten da. 4.7 Irudian *flipud* aplikatzean lortzen den Y matrize berria ikus daiteke.

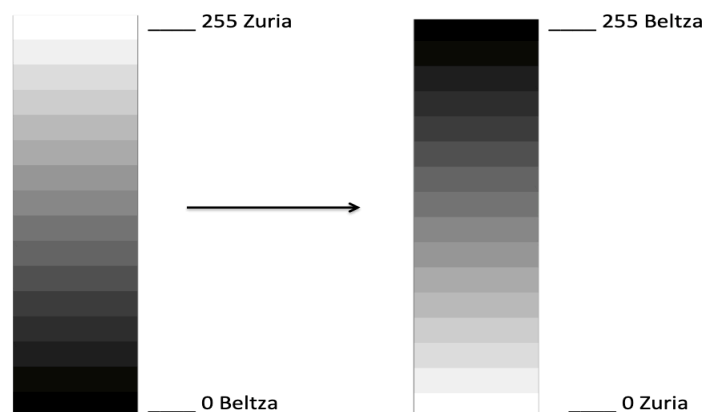


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
3	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
4	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
8	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

4.7 Irudia. Y matrize berria *Flipud* aplikatu eta gero. Jatorria aldatu da.

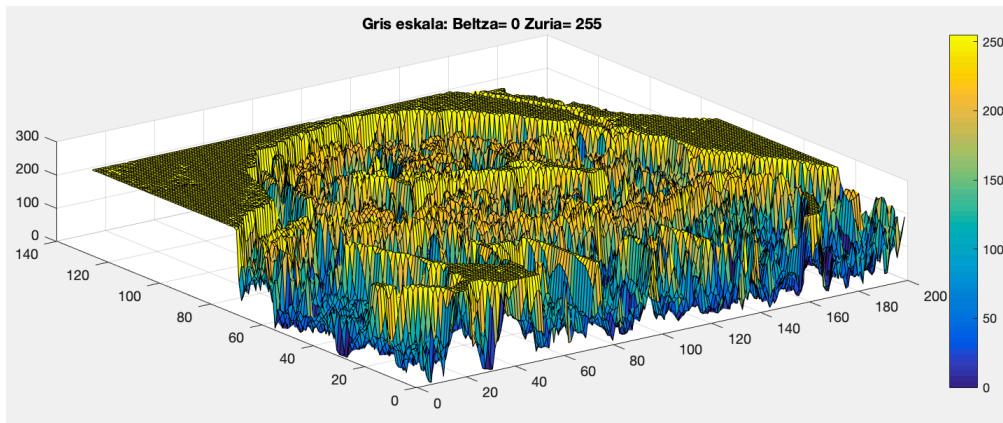
Jada prest daude X eta Y matrizeak *stlwrite* funtzioaren sarrerako aldagaiak izateko. Z matrizeari dagokionez, ordea, zenbait eraldaketa burutu behar dira oraindik.

Imadjust funtzioa aplikatzean lortu den matrizeko (Z altuera matrizea izango dena) pixel bakoitzak 0-255 tarteko balioak ditu, 0 beltza eta 255 zuria, lehen aipatu bezela. 3Dko objektua sortzeko orduan, ordea, informazio eza kolore zuria izan behar da, hau da, mikroskopia elektronikoaren bidez ez bada ezer antzematen, zuriz errepresentatua izango da. Ondorioz, interesatzen dena 0 balioa zuria izatea eta 255 beltza izatea da. Beraz, koloreen intentsitateen balioak irauli behar dira Z matrizean. Beste modu batera esanda, pixel bakoitzaren **altuera alderantziz proportzionala** izatea nahi da gris tonuarekiko.

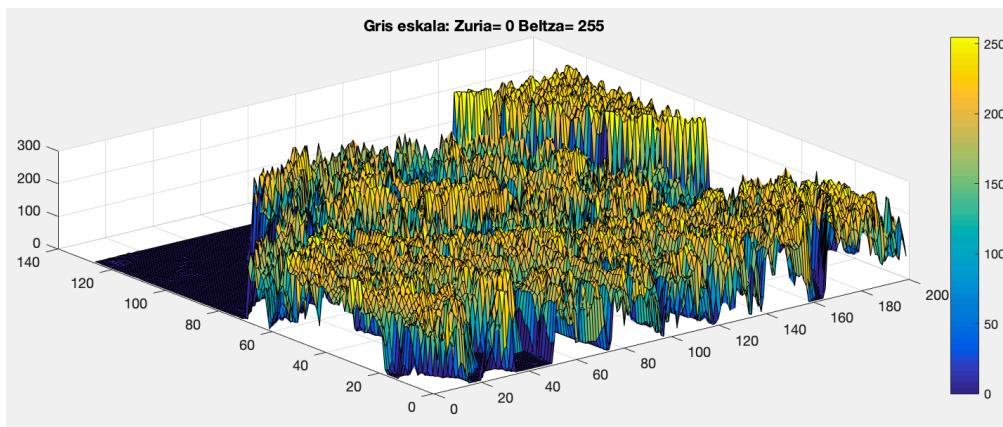


4.8 Irudia. Pixelaren intentsitate eta gris tonuaren erlazioa

Gris eskala aipatutako bi modu ezberdinetan oinarri duten gorputzak ikusten dira 4.9 eta 4.10 Irudietan, eta argi dago zuria 0 baliokoa izanda eta beltza 255koa, irudiaren 3Dko objektuaren erliebe egokiagoa lortuko dela.



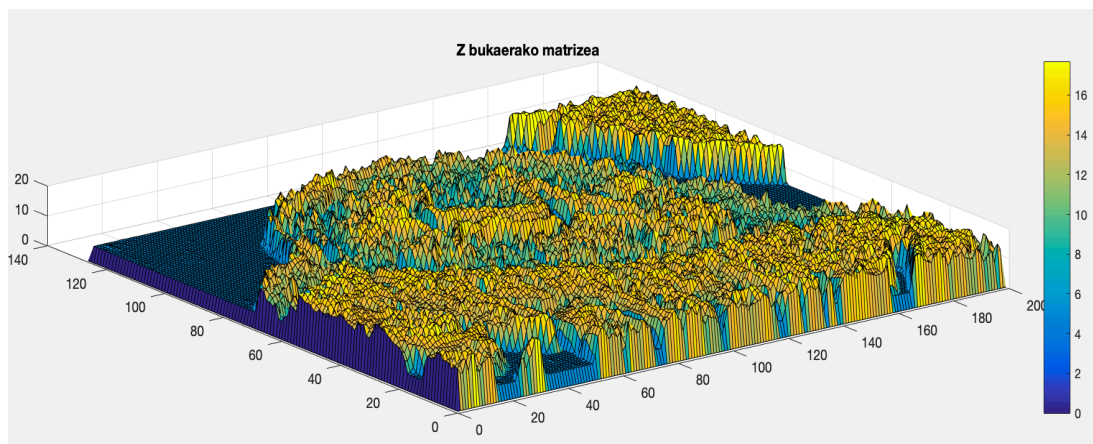
4.9 Irudia. Beltza 0- Zuria 255 hasierako disposizioa. Irudia goitik behera sortzen da.



4.10 Irudia. Zuria 0- Beltza 255 bukaerako disposizioa. Irudia behetik gora sortzen da.

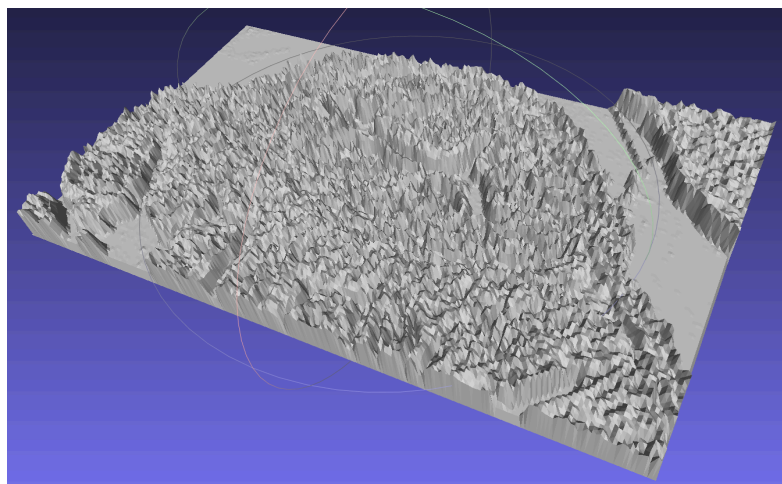
Hurrengo pausua **Z matrizearen altuera mugatzea** da, reeskalaketarekin irudiaren dimentsio planoak mugatu diren bezela. Objektuaren erliebearen altuera maximoa 12,7 mm-tan mugatuko da (0,5 inches), 3Dko inprimagailuaren espezifikazioetara egokitzeko helburuarekin. Orain Z matrizea, 0-12,7 balio tarteko pixelak dituen matrizea da.

Baina inprimaketa prozesua egin ahal izateko, irudiak oinarri bat eduki behar du, inprimagailuak objektuaren hasiera gisa identifikatu dezan eta material gehikuntza hortik abiatu dezan. Horretarako, 5 mm-ko base bat sortzen da, matrizearen kontornoko pixelei 0 balioa egokituz. Horrela, inprimagailuak 0-5 mm tarteko oinarri bat sortzen du, guztiz itxia eta jarraia izango dena. Eragiketa honekin *stlwrite* funtziorako sarrera aldagaia den bukaerako Z matrizea lortzen da, 4.11 Irudian errepresentatzen dena.



4.11 Irudia. Bukaerako Z matrizea. Kontornoa eta oinarria ikusi ditzazkegu.

Beraz, *stlwrite* funtzioaren sarrera aldagai guztiak lortuta (X, Y eta Z matrizeak) funtzioa deitu eta STL artxiboa lortuko da. Funtzio honek hiru matrizeetako informazioa triangulatzen du Delaunay motako triangulazioa erabiliz. Honekin STL motako artxiboa lortzen da, non azaldu bezela azalera geometria osatzen duten trianguluen bertize eta bektore normalen bidez deskribatzen den.



4.12 Irudia. MatLab programatik lortu den STL artxiboa MeshLab-en ikusita

Lortzen den objektuak daukan zimurtasuna handia da, eta honek itsu edo ikusmen urritasuna daukan pertsona batek egin dezakeen ukipenaren bidezko irakurketa zaildu dezake. Beraz, metodologiaren hurrengo pausua zimurtasun hau murriztu eta azalera leunago bat lortzea izango da MeshLab programaren laguntzarekin. Jarraian beraz, metodologiaren bigarren atala azalduko da.

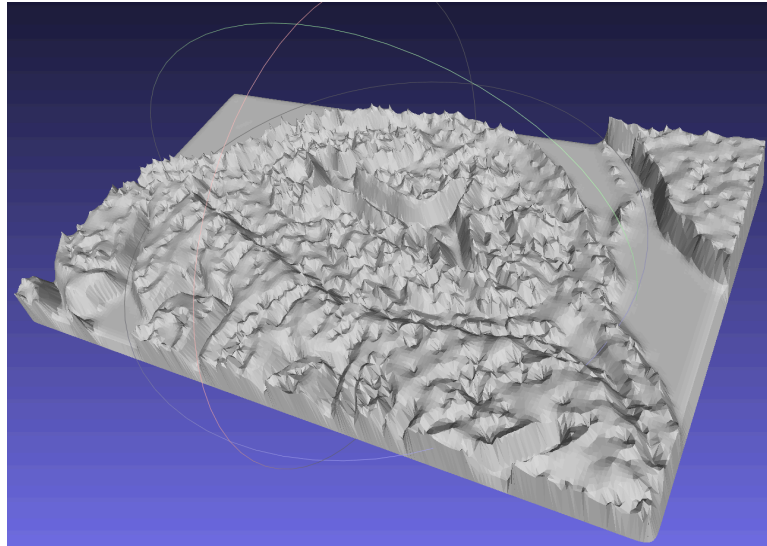
4.2 STL artxiboa modifikatu. MeshLab

Behin STL motako artxiboa sortuta, inprimagailura bidali aurretik, ukipenaren bidezko irakurketa hobetze eta optimisatze aldera, MeshLab programaren bitartez filtro ezberdinak aplikatuko zaizkio. Prozesu honetan materialak izan ditzazkeen zulo edo jarraitasun ezak ere zuzenduko dira. Teknikoki, gero eta leuntasun gutxiago aplikatuta, hau da, filtraketa gutxiago aplikatuta, 3Dko modeloak izango duen informazioa handiagoa izango da, irudi originala gutxiago egongo baita editatuta. Hala ere, zimurtasun handia edukitzeak ukipenaren bidezko irakurketa oztopatu dezake. Ondorioz, oreka bat aurkitu behar da, leuntasun egoki baten eta irakurketa egoki bat burutzeko informazio kopuru nahikoa edukitzearen artekoa.

Aplikaturako filtro guztiak, leuntasunezko ezaugarrietan oinarritutakoak izango dira. Irudi prozesaketaren teoriaren arabera, filtroak aplikatzearen helburu nagusiak irudiaren zarata ezabatzea edota irudiaren leunketa egitea dira. Proiektuan garrantzia eman zaio irudiaren azaleraren leunketa bati, ikusmen arazoak dituen pertsonaren irakurketa egoki batean pisu handiagoa izan dezakeelako. Leunketa filtro denek ondoko ondoko pixelen arteko intentsitate bariazioen murrizketa dute oinarritzat.

5 irudi ezberdinetatik lortutako STL bakoitzari 3 filtro ezberdin aplikatu zaizkio: Laplacian smoothing, Two steps smoothing eta Taubin smoothing (denak ere MeshLab programan integratuta eta eskuragarri daude). Iterazio kopuru ezberdinekin probatu da eta azkenean emaitza onenak lortzen diren kopurua aukeratu, GOM Inspect-en konparaketa baten ondorioz. Jarraian filtro bakoitzaren nondik norakoak azalduko dira, eta bakoitzarekin lortutako emaitzak aurkeztu. Analizatutako 5 irudietatik bakoitzari zenbat iterazio aplikatu zaizkion ere zehaztuko da.

Laplacian Smoothing izeneko algoritmoak sare poligonal bat leuntzeko balio du. Triangulu bakoitzeko bertize batentzat, posizio berri bat aukeratzen da, ondoko nodoen informazioa kontuan hartuz eta batezbesteko posizio bat ezarritz.



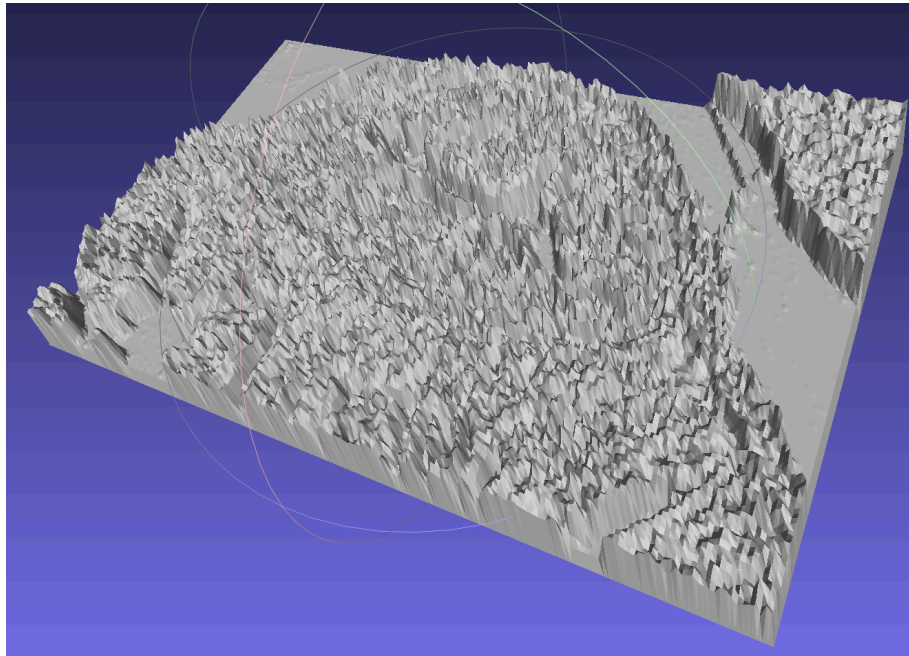
4.13 Irudia. Irudi2 STL artxiboa Laplacian Smooth filtroarekin

Iterazio kopurua irudi bakoitzaren konplexutasunaren arabera da, baina metodologia orokor bat ezartze aldera eta prozedura sinplifikatzeko asmoarekin, bi iterazio kopuru ezberdin zehaztu dira. Horretarako, iterazio kopuru ezberdinak aztertu dira, banan banako aplikazioarekin, objektuan inungo hobekuntzarik ikusi ez den arte. Argazkia oso uniforme bada, pixelen intentsitate aldaketa handirik gabekoa eta erliebe egonkorrekoa bada, 5 iteraziorekin emaitza egokia lortzen dela ikusi da (Irudi 3 eta Irudi 5-en kasua da). Irudiak pixel intentsitate jauzi handiak aurkezten baditu, 0 balioko pixelen zonak edota kolore aldaketa nabarmenak, 10 iterazio aplikatu behar dira emaitza egoki bat lortzeko (Irudi1, Irudi2 eta Irudi4-ren kasua izango litzateke). Kontuan hartu behar dugu, azkenengo irudi hauei 10 iterazio aplikatu beharrean, 5 aplikatuta lortzen den emaitza ez dela guztiz txarra izango. Lortutako emaitza onargarria izango da, baina 10 iterazio aplikatzean, are eta egokiagoa den objektua sortzen da, leuntasun puntu hobearekin. 4.14 Irudian Laplacian smoothing filtroaren iterazio ezberdinak agertzen dira aztertutako 5 irudientzat.

HISTOLOGIAKO IRUDIAK	.STL ARTXIBOA	RESOLUZIOA	REESKALAKETA	LAPLACIAN SMOOTHING	ITERAZIO KOPURUA
IRUDI 1	histocelular.stl	480x600	160X200	histocelular1.stl	10
IRUDI 2	histopancreas.stl	1140x1800	127X200	histopancreas1.stl	10
IRUDI 3	arteria.stl	1920x2560	150X200	arteria1.stl	5
IRUDI 4	arteria_benak.stl	1920x2560	150X200	arteria_benak1.stl	10
IRUDI 5	odola.stl	1920x2560	150X200	odola1.stl	5

4.14 Irudia. Laplacian Smoothing filtroaren aplikazio zehaztasunak eta parametroak

Two step smoothing algoritmoak bektore normalen sinplifikazioa du oinarri, non antzerako posizioa duten bektore normalak bateratu egiten diren. Gainera, bertzeen arteko sinplifikazio bat ere egiten da, hauen arteko distantzia txikia bada. MeshLab programak zenbait parametro ezartzeko aukera ematen du filtroa aplikatzean, eta metodologia sinplifikatze aldera, 5 irudiei parametro berdinak aplikatu zaizkie. 4.16 Irudian, aipatutako Two step filtroaren parametroak ikusi daitezke, aplikatutako iterazio kopuruarekin batera.



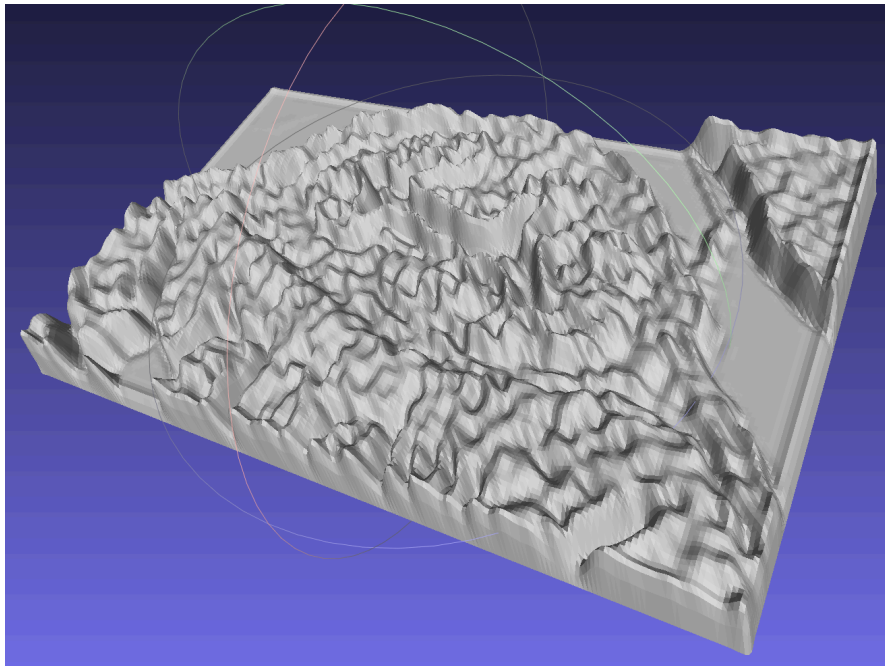
4.15 Irudia. Irudi2 STL artxiboa Two steps filtroarekin

HISTOLOGIAKO IRUDIAK	.STL ARTXIBOA	RESOLUZIOA	REESKALAKETA	TWO STEPS SMOOTH	ITERAZIO KOPURUA
IRUDI 1	histocelular.stl	480x600	160X200	histocelular2.stl	10
IRUDI 2	histopancreas.stl	1140x1800	127X200	histopancreas2.stl	10
IRUDI 3	arteria.stl	1920x2560	150X200	arteria2.stl	5
IRUDI 4	arteria_benak.stl	1920x2560	150X200	arteria_benak2.stl	10
IRUDI 5	odola.stl	1920x2560	150X200	odola2.stl	5

TWO STEPS PARAMETERS	
Angle Threshold (deg)	10
Normal smoothing steps	20
Vertex fitting steps	20

4.16 Irudia. Two steps filtroaren aplikazio zehaztasunak eta parametroak

Taubin smoothing metodoak iterazio bakoitzeko aurrera atzerako algoritmo Gaussiarra bi aldiz aplikatzen du. Honek ere bertizeen sinplifikazioa dauka oinarri, non bi bertizeen arteko distantziaren batzbestekoan sinplifikatzen den. Aurreko filtroekin egin bezela, 4.18 Irudian Taubin filtroaren parametro ezberdinak eta iterazio kopuruak ageri dira.



4.17 Irudia. Irudi2 STL artxiboa Taubin filtroarekin

HISTOLOGIAKO IRUDIAK	.STL ARTXIBOA	RESOLUZIOA	REESKALAKETA	TAUBIN SMOOTHING	ITERAZIO KOPURUA
IRUDI 1	histocelular.stl	480x600	160X200	histocelular3.stl	10
IRUDI 2	histopancreas.stl	1140x1800	127X200	histopancreas3.stl	10
IRUDI 3	arteria.stl	1920x2560	150X200	arteria3.stl	5
IRUDI 4	arteria_benak.stl	1920x2560	150X200	arteria_benak3.stl	10
IRUDI 5	odola.stl	1920x2560	150X200	odola3.stl	5

TAUBIN PARAMETERS	
Lambda λ	0,7
Mu μ	-0,8

4.18 Irudia. Taubin filtroaren aplikazio zehaztasun eta parametroak

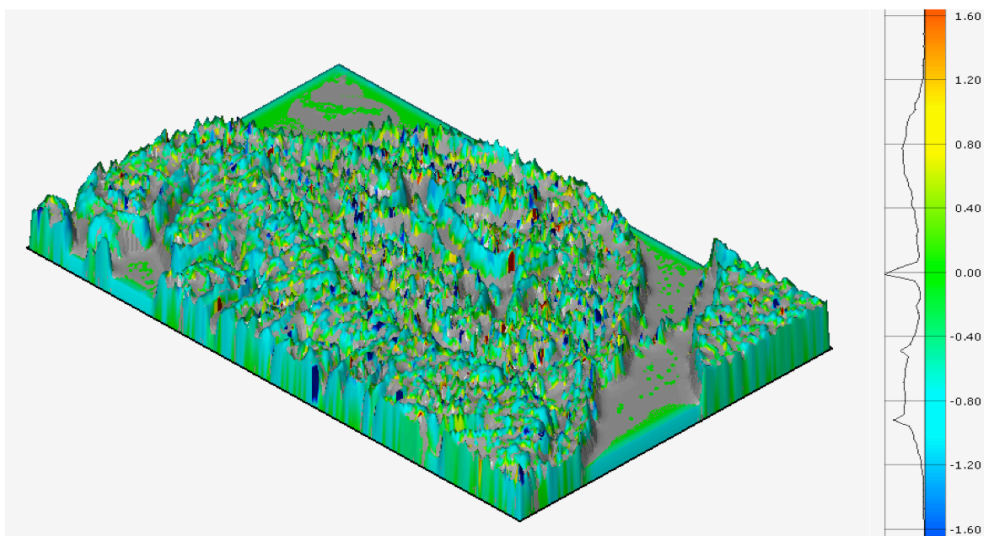
4.3 STL ezberdinen arteko konparaketa. GOM Inspect

Behin MeshLab programaren bitartez historiako 5 argazkiei 3 filtro ezberdinak aplikatuta, 3Dko objektuaren sorkuntzarako eta ukipenaren bidezko irakurketarako egokiena den iragazkia aukeratu da. Horretarako, GOM Inspect programa erabiliko da.

Irudi bakoitzerako prozesu bera errepikatu da, non STL originala, MeshLab-eko filtro gabekoa, alegia, eta iragazkia pasatutako STL bakoitza konparatu diren. STL originala CAD bezela inportatu da, eta filtroa duena sare gisa honekiko konparatu. Inportatutako bi artxiboak MatLab-eko prozesu beraren bitartez sortuta daudenez, objektuek jatorri puntu bera izango dute, eta ondorioz MeshLab programak automatikoki alineaketa burutuko du. Konparaketa egiteko orduan, beraz, bi STL-ak espazioko puntu beretan egongo dira kokatuta.

Histogramaren laguntzarekin, originalarekiko zenbat material gehitu edo kendu den ikusi daiteke, eta modeloaren zein atali ematen zaion garrantzia handiena filtro bakoitzean. Helburua modeloaren itxura asko aldatu gabe erpinen eta punten, hau da, irakurketa zaildu edo desatsegina egin dezaketen puntuen leunketarako filtro egokiena bilatzea da.

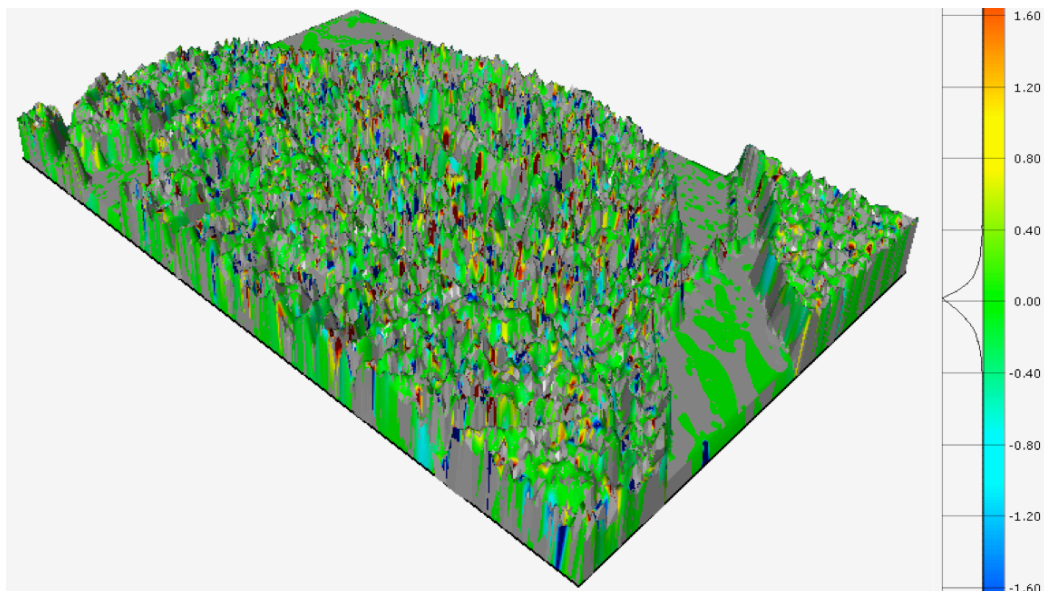
Irudi 2-ren kasua azalduko da, beste irudiekiko aplikagarria baita, eta prozesuaren metodologiarako emaitza egokiak lortzea ahalbidetzen baititu. Lehenik eta behin filtro gabeko solidoa eta *Laplacian smoothing* leuntasun iragazkia aplikatzearen ondorioz lortutako solidoa konparatu dira. 4.19 Irudian aipaturiko konparaketa ikusi daiteke.



4.19 Irudia. Irudi 2 STL-a Laplacian smooth filtroarekin eta dagokion histograma

Histograman ikusi daitekenez, material gehiketa eta ezabaketa $[-1.2, 1.2]$ mm tartean kontzentratzen da. 0.0 puntu inguruko iterazioak handiak dira, material gutxi edo ia ezer aldatu diren puntuak, hain zuzen ere. Bai gehiketa eta bai ezabaketan, 0.8 mm inguruan dauka puntu altuena. Ez dago alde handirik material gehiketa eta ezabatze kantitatearekin.

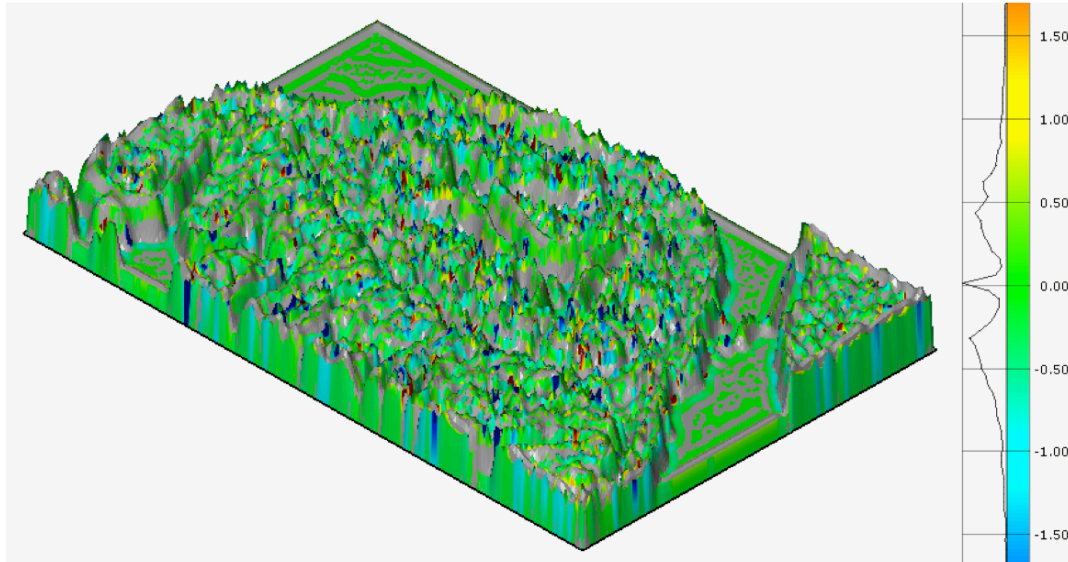
Jarraian, STL artxibo originala eta MeshLaben *Two steps smoothing* filtroa aplikatutako artxiboak konparatu dira, 4.20 Irudian lortutako emaitzak ikusi daitezkelarik.



4.20 Irudia. Irudi 2 STL-a *Two Steps* filtroarekin eta dagokion histograma

Begi hutsez ikusi daitekenez, zuzenketa guztiz ezberdina izan da *Laplacian* filtroarekin konparatzen bada. Iragazketa honen algoritmoak material gehiketa eta kenketa ia guztia $[-0.4, 0.4]$ mm-ko tartean egiten du. *Laplacian* filtroak baino zuzenketa globalagoa egin du, modeloaren puntu gehiagotan eragiten, baina pixelen intentsitatean pisu gutxiagorekin.

Bukatzeko, hasierako modeloaren eta *Taubin smoothing* filtroa aplikatutako modeloaren arteko konparaketa egin da GOM Inspect programaren laguntzarekin.

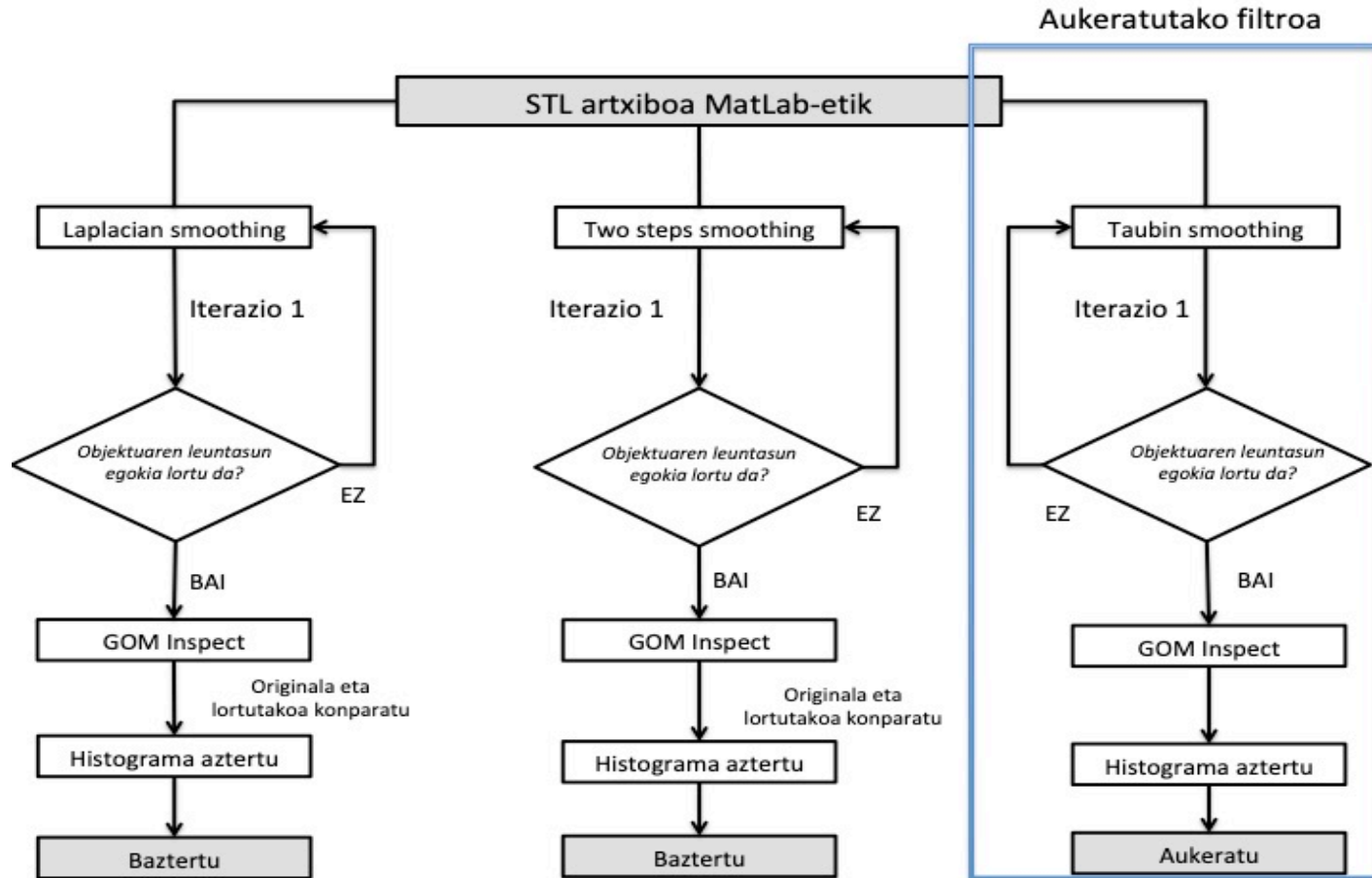


4.21 Irudia. Irudi 2 STL-a Taubin smooth filtroarekin eta dagokion histograma

Two steps filtroarekin ezberdintasunak nabarmenak dira histograma aztertzerako orduan. Egia da 0.00 puntuaren inguruan zenbait zuzenketa egiten direla, baina filtroaren aplikazioak ez du puntu hori oinarri. Izan ere, material gehikuntza 0.40 tolerantzia inguruan zentratzen da, material ezabatzea -0.4 ingurutik progresiboki -1.5 punturarte jeisten delarik.

Inprimagarria den eta ukipenaren irakurketarako baliagarria den objektu bat sortzeko, 3 filtro hauen artean egokiena *Taubin smoothing* dela ondorioztatu da. Histogramaren informazioan oinarrituz, zuzenketa erregularrena eta leunketa egokiena burutzen duena dela ikusi da. *Two step* metodoak erpinak zuzentzen ditu batez ere, baina gainontzeko leunketan ez du sakontzen. Nahiz eta *Laplacian* algoritmoa ere printzipioz egokia izan proiekturako, objektu originalaren forma *Taubin* metodoak hobeto mantentzen du. Gainera, *Taubin* filtroa gehiago zentratzen da materialaren soberako ezabaketan, *Laplacian* filtroa material gehikuntzan gehiago zentratzen delarik. Prozesuaren eta baliabideen erabileraren optimizaziorako egokiagoa dela ondorioztatu da materialaren soberako ezabaketa, material berria gehitzea baino.

4.22 Irudiko eskemaren bitartez MeshLab eta GOM Inspect programen bidez burututako prozesuaren fluxograma aurkezten da, non ondorio bezela Taubin filtroaren aukeraketa zehazten den.



4.22 Irudia. MeshLab eta GOM Inspect programetan burututako prozesuen Fluxograma

4.4 Objektua sortu 3D Inprimagailuarekin.

STL artxiboa sortu, MeshLab-en bidez filtroak aplikatu eta definitiboa izango dena aukeratutakoan, azkenengo pausua faltako litzateke, 3D inprimagailuaren bidez prozesuaren emaitza izango den objektua sortzea, hain zuzen ere.

4.1 STL formatuko artxiboa sortu. MatLab atalean azaldu bezela, *RGBtikSTLra.m* script-ak irudiaren zutabe kopurua 200 pixeletara mugatzen du lehenengo reeskalaketaren bidez. Honek esan nahi du irudi originala 1920x2560 resoluziokoa bada, reeskalaketak 150x200-ra mugatuko duela. Hau da, prozesatutako irudia 15x20 cm-ko oinarria izango duen objektu bilakatuko da. Edozein arrazoiengatik 3Dko objektua txikiagoa izatea nahi bada, bigarren reeskalaketa bat egingo litzateke. 3Dko inprimagailuak errazten duenez prozesu hau, inprimatzeko momentuan bertan ezarriko lirateke objektuaren dimentsio berriak.

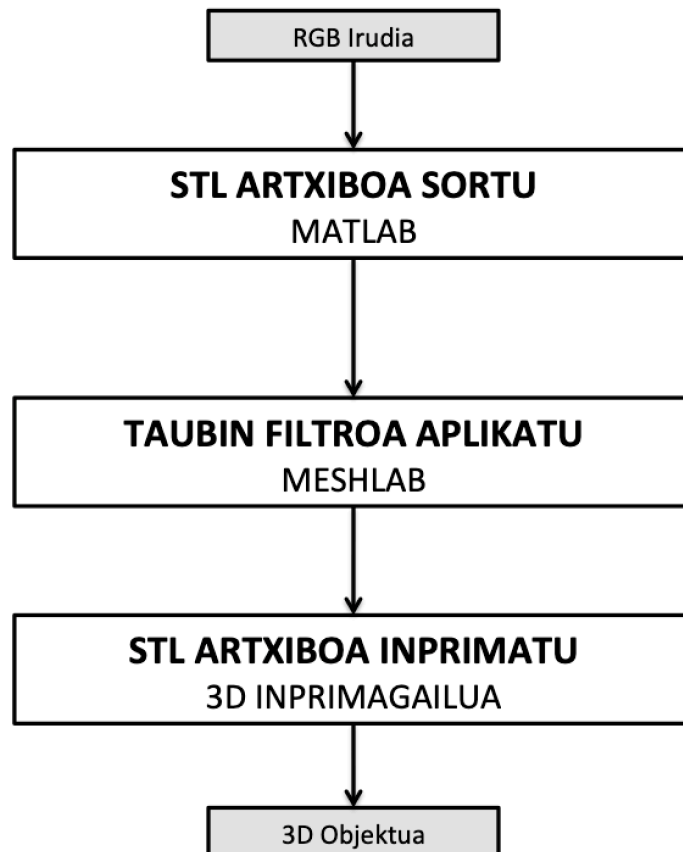
Beraz, hasiera batean sortutako prozesuak 20cm-ko aldera mugatuko du objektuaren dimentsio nagusia, baina modifikatzeko beharra eduki ezkeru posible litzateke bigarren reeskalaketa bat egitea. Honek, modifikatutako eta egokitutako STL artxiboa tamaina ezberdinetan inprimatzea ahalbidetzen du.

Metodologiaren pausu honetan beraz, Taubin filtroarekin modifikatutako STL-a ea inprimagarria den konprobatu da, metodologia hau aplikatzean sortutako objektuak zulo edo jarraitasun ezak ez dituela aztertu, alegia.

5. APLIKAZIOA KASU PARTIKULAR BATEN

Lanaren metodologian azaldu da jada RGB irudi batetik abiatuz 3D objektu bat sortzeko prozesu egokienaren bilaketa. Prozesu hau egokiena izateko eta emaitzen optimizaziorako egindako aukeraketak ere azaldu dira. Beraz, prozesu egokiena aukeratuta, metodologia hau aplikatzea nahiko lukeen erabiltzaileak jarraitu beharreko pausuak azalduko dira ondorengo lerroetan.

Azalpen honen bitartez, 2Dko RGB irudi bat daukan eta 3Dko objektu bat sortzea nahi duen pertsona batek zein prozesu jarraitu behar duen azalduko da pausuz pausu. Prozesu hau 5.1 Irudian laburtuta ikusi daiteke.



5.1 Irudia. RGB iruditik 3D objekturako prozesua

Prozeduraren lehen pausua MatLab programaren bidez STL artxiboa sortzea izango da. MatLab-en RGBtikSTLra.m script-a era egokian exekutatu ahal izateko, lan egingo den karpetan (*current folder*) prozesatu nahi den irudiak, RGBtikSTLra script-ak eta stlwrite funtzioak egon behar dute. Horretarako, ERANSKINAK dokumentuan eskuragarri dauden gidoi bakoitza kopiatu, MatLab-eko editorean (*New script-editor*) itsatsi eta script-a zein funtzioa .m estentsioarekin eta dagokien izenarekin lan egingo den karpetan gorde besterik ez da egin behar. Behin prozesu hau burututa, RGBtikSTLra.m script-a irekiko da.

Exekutatu aurretik, erabiltzaileak zenbait informazioa erraztu behar du. RGBtikSTLra.m irekitzean agertzen den “Exekutatu aurretik, beharrezko datuak” atala bete behar da. Argi zehazten den bezela, erabiltzaileak prozesatu nahi duen irudiaren izena (dagokion estentsioarekin: tiff, jpeg, gif, bmp, png...) eta sortu nahi duen STL artxiboaren izena zehaztu behar ditu. Hortik aurrera, “run” komandoa sakatzearekin script-a exekutatzean bera bakarrik gauzatuko da prozesu guztia, automatikoki zehaztutako izeneko STL artxiboa sortuko duelarik laneko karpetan bertan.

Behin STL artxiboa lortuta, hurrengo pausua honi filtroak aplikatzea izango da, leuntasun egoki bat eduki dezan. Metodologian ondorioztatu den bezela, horretarako MeshLab programak errazten duen Taubin filtroa aplikatuko zaio STL-ari. STL artxiboa inportatu eta gero, Filters ataleko *smoothing, fairing and deformation* azpiatalean *Taubin smooth* aukeratu behar da. Hemen 3 dira sartu beharreko datuak. Lambda $\lambda=0,7$ eta Mu $\mu = -0,8$ parametroen balioak edozein iruditarako berdinak izango dira. Iterazio kopurua, ordea, ezberdina izan daiteke aurreko atalean azaldu den bezela. Irudiak kolore aldaketa asko, forma ezberdin asko eta kontraste handia badauka, erabiltzaileak 10 iterazio aplikatu beharko dizkio. Aztertutako irudia, ordea, monokromatikoa bada, plano eta intentsitate aldaketa gutxikoa, 5 iterazio aplikatzearekin leuntasun egokia lortuko du. Filtroa aplikatu eta gero, STL artxibo gisa gordeko da MeshLabeko proiektua.

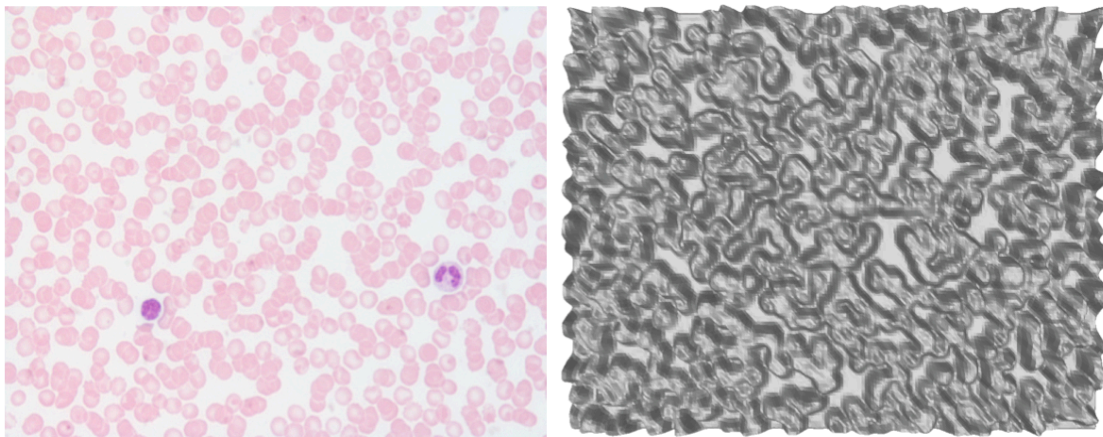
Prozesuaren azkenengo pausua objektuaren inprimaketa izango da. MeshLabetik lortutako STL artxibo editatua prest dago inprimagailuan inportatzeko. Inprimagailuko software-ean bigarren reeskalaketa bat egiteko aukera egongo da, erabiltzaileak horrela nahiko balu. Bestela, inportatutako STL artxiboa inprimatzearekin RGBko irudi batetik abiatuz 3Dko erliebedun objektu bat lortzearen prozesuari amaiera emango zaio.

6. EMAITZAK

Aurreko atalean jada metodoa aplikatzeko prozesu egokiena eta emaitza hoberenak ematen dituen ondorioztatu da. Horrenbestez, atal honetan metodo hori aplikatzean lorturiko emaitzak erakutsiko dira.

Histologiako 5 RGB irudi ezberdinei prozesaketa guztia aplikatuta lortzen diren STL motako artxiboak azaltzen dira jarraian, MeshLab-eko *Taubin* filtroarekin leunduta daudelarik. STL hauek prest daude 3D inprimagailuan inportatu eta 3D objektua sortzeko. Azkenengo pausu hau irudi bakarrarekin egin da, materiala eta denbora aurrezte aldera. 3Dko objektua sortzeko *Irudi 5* aukeratu da, konplexutasun handiena duen irudia baita, eta irudi honekin emaitza onargarriak lortu ezker, besteekin ere onak izango liratekelako.

Lehenik eta behin *Irudi 5* argazkiari dagozkion emaitzak adierazten dira 6.1 Irudian. Aipatu bezela ukipenaren bidezko irakurketarako zailtasun handienak azaltzen dituen irudia da, osatzen duten odolaren globuluen arteko distantzia txikia dela eta.



6.1 Irudia. RGB eta STL Irudi 5

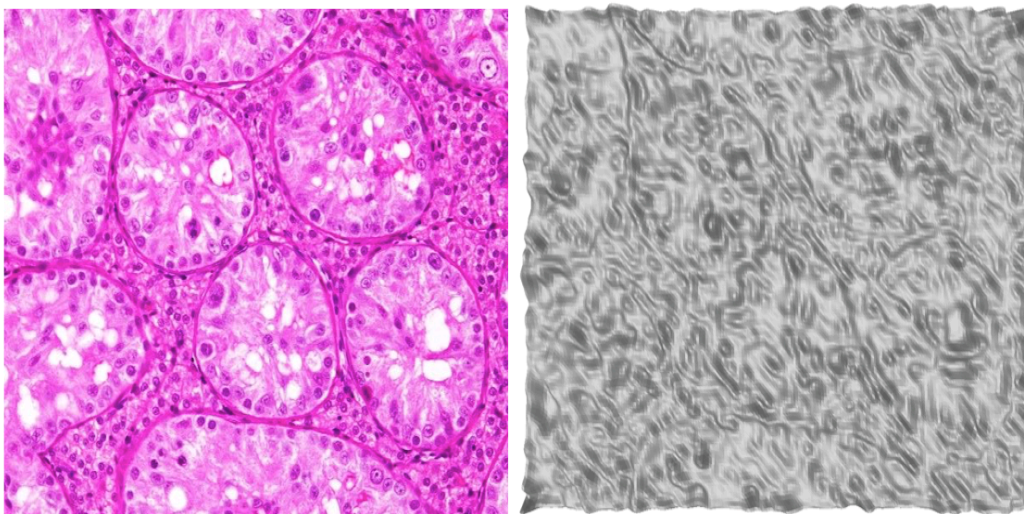
6.2 Irudian ikusi daitekeen inprimatutako 3D objektua aztertzean, zera antzeman daiteke: Oinarri eta egitura egokia sortu dira, inungo hutsune edo irregulartasunik gabekoak. Lanaren helburua ukipenaren bitartez sortutako objektua identifikatzea posible izatea da, eta aipatu bezela lortutako objektuak zenbait zailtasun azaltzen ditu. Aurrerago ondorioen atalean azalduko den bezela, inprimatzean objektuaren tamainak eragin handia dauka eman dezakeen informazio kantitatean. Lanean inprimatu den objektuaren tamaina txikia dela eta, ez da erreza suertatzen

ukipenezko irakurketa egitea. Hala ere, objektuak RGB irudiaren ideia orokor bat edukitzeko balio dezake.

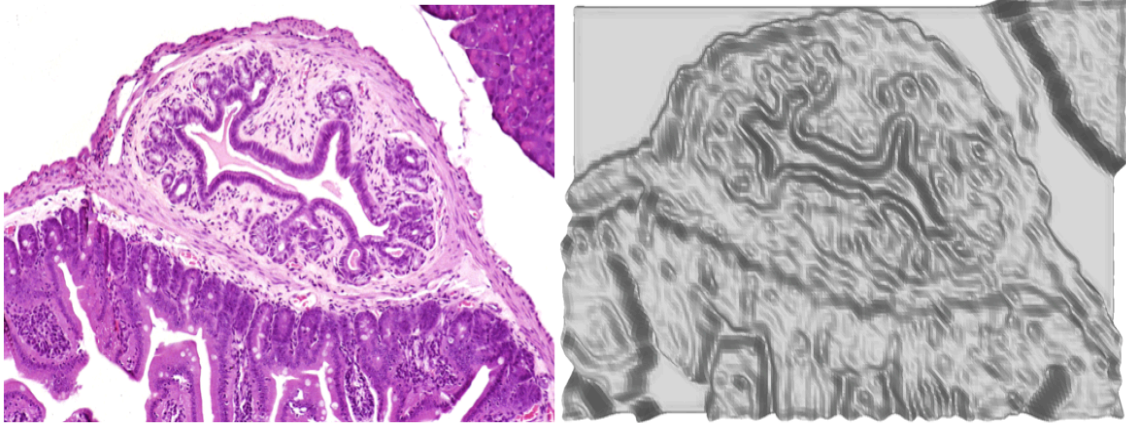


6.2 Irudia. Bukaerako objektu inprimatua Irudi 5

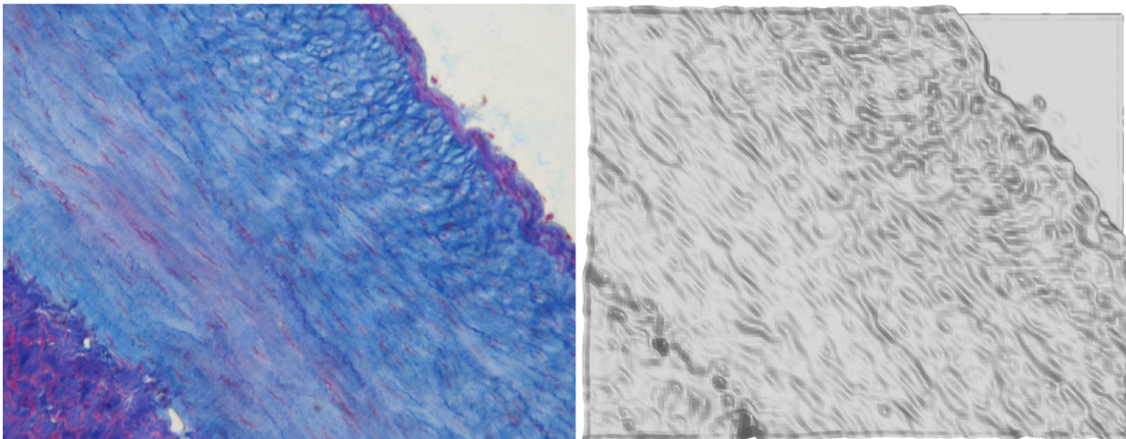
Jarraian, azertu diren beste 4 irudien RGB eta lortutako STL artxiboak erakutsiko dira. Irudi 1, Irudi 2, Irudi 3 eta Irudi 4-ren emaitzak hurrenez hurren:



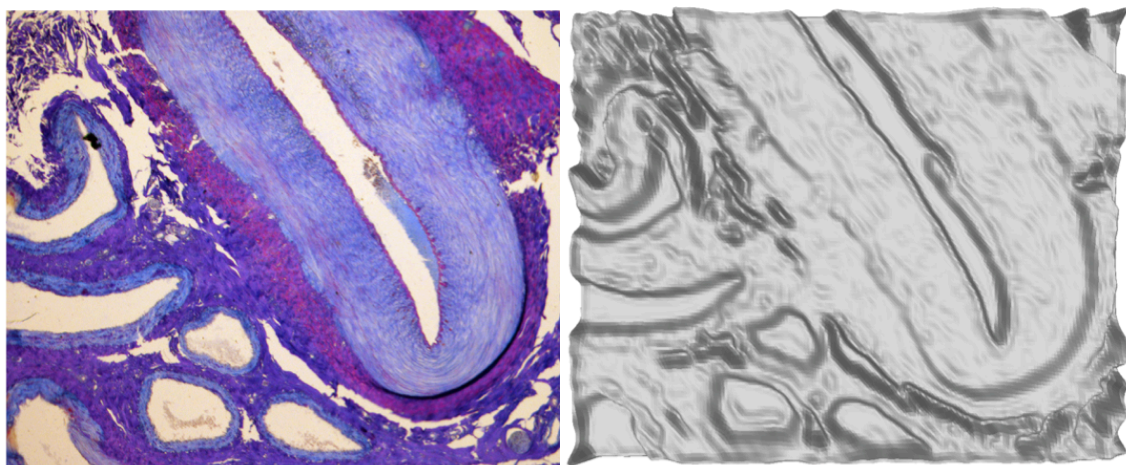
6.3 Irudia. Irudi 1 hasierako RGB eta lortutako STL formatuetan



6.4 Irudia. Irudi 2 hasierako RGB eta lortutako STL formatuetan



6.5 Irudia. Irudi 3 hasierako RGB eta lortutako STL formatuetan



6.6 Irudia. Irudi 4 hasierako RGB eta lortutako STL formatuetan

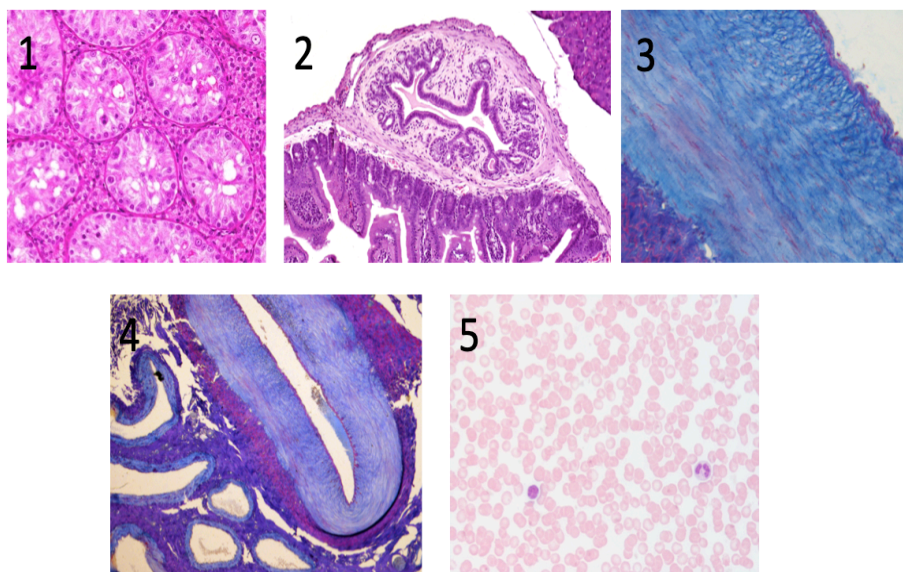
7. BALIABIDEAK

7.1 Histologiako argazkiak

Lan honetan histologiako 5 argazki ezberdin erabili dira UPV/EHUko Zoologia eta Animalia Zelulen Biologia sailak eta Plentziako Itsas Estazioak eskeinitakoak. 7.1 Taulan bakoitzari ezarritako izena, hasierako resoluzioa eta deskribapen txiki bat agertzen da.

7.1. Taula. Histologiako 5 irudien ezaugarriak

Izendapena	Izena	Resoluzioa	Deskribapena
Irudi 1	histocelular.jpg	480x600	Meiosia
Irudi 2	histopancreas.jpg	1140x1800	Pankreas guruina: Epitelio eta ehun konektiboak
Irudi 3	arteria.jpg	1920x2560	Arteria: Endotelioa eta muskulu geruza
Irudi 4	arteria_benak.jpg	1920x2560	Arteria: endotelio lodia. Benak: endotelio mehea.
Irudi 5	odola.jpg	1920x2560	Odola, ehun konektiboa: Eritrozito, leukozito eta plaketak



7.1 Irudia. Erabilitako histologiako 5 irudiak

Agerikoa da argazki bakoitzak daukan konplexutasuna, saturazioa, argitasuna, kolore gama... oso ezberdina dela, eta ezaugarri desberdinak izateagatik ezin zaie guztiei prozesu bera aplikatu. Ondorioz, aipatu bezela, MeshLab erabiltzeko orduan, filtroak aplikatzean leuntasun iterazio kopurua ez da bera izango argazki guztietan. Hala ere, 5 irudiak ezberdinak direnez, hauentzat metodologia aplikagarria bada, histologia arloko edozein irudi motarentzat izango da aplikagarria.

7.2 Erabilitako programak

7.2.1 MatLab

MatLab (Matrix Laboratory-ren laburdura) MathWorks korporazioak garatutakoa garapen integratuko ingurunea (IDE) eskaintzen duen zenbakizko zenbaketa sistema bat da, berezko programazio lengoia duena (M lengoia deiturikoa). Lanerako R2016b (9.1.0) bertsioa erabili da.

7.2.2 MeshLab

MeshLab ISTI-CNR ikerkuntza zentroak garatutako software sistema da, 3Dko sareen prozesaketarako egina. Zenbait erreminta errazten ditu objektuak editatzeko, garbitzeko, zuzentzeko edota konpontzeko. Lanerako MeshLab VCG-ISTI-CNR bertsioa erabili da.

7.2.3 GOM Inspect

GOM software-a, produktuen garapenean, kalitate kontroletan eta produkzioan erabiltzen den programa da, 3Dko metrologia azterketak egitea ahalbidetzen baitu. Laneko eginkizunak burutzeko orduan 2018 urteko bertsioa erabili da.

7.3 3D inprimagailua

Bilboko Ingeniaritza Eskolako Product Design Laboratory-n aurkitzen den 3D inprimagailua erabili da prozesuaren ondorioz lortutako STL artxibo definitiboak inprimatzeko. "Dimension Elite" markako inprimagailua da, zeinek STL motako artxiboak irakurtzeko software-a inplementatua duen.

8. LANAREN PLANIFIKAZIOA

8.1 Eginkizun eta betebeharren deskribapena

Jarraian proiektuan aurrera eramandako eginkizun ezberdinak azalduko dira, hauen deskribapen bat erraztuz, baita eginkizun bakoitzeko helburu eta entregatu beharrekoa zehaztuz. Honen ondoren, eginkizun guzti hauek kronologikoki Gantt diagrama baten bidez bistaratuko dira.

1. Eginkizuna: Testuinguruaren azterketa (60 egun)

- **Deskribapena:** Lanaren nondik norakoak ezagutzeko eta aurrerago sortuko den metodologiaren oinarria edukitzeko, hainbat dira aztertu eta ikasi beharrekoak:
 - Irudi prozesaketari buruzko teoria
 - Ikusmen arazodunen laguntzarako 3D objektuen inguruko informazioa
 - Erabili beharreko programen (MatLab, MeshLab eta GOM Inspect) oinarri teorikoa eta maneiaren ikasketa
 - Ikergaiaren inguruan aurretik egindako lanak ere aztertu
 - Objektuaren leuntasun egoki bat lortzeko filtro ezberdinen inguruko informazioa
- **Helburua:** Ukipenarekin irakurtzeko posible den objektu batek izan beharreko ezaugarrien ondorioztatzea eta proiektua garatzeko erabili beharreko programen ezagutza. Baita aplikatu daitezkeen filtroen aukeraketa ere.
- **Entregatzekoa:** Testuinguruaren lehendabiziko informazioa.

2. Eginkizuna: RGBtikSTLra script-a idatzi. MatLab (20 egun)

- **Deskribapena:** MatLab programaren bidez, RGB irudi bat sarrerako aldagai bezela duen eta STL formatuko artxibo bat sortzen duen algoritmo baten sorkuntza, irudien prozesaketari buruz aztertutakoa aplikatuz. Metodologia arloan azalduko MatLabeko pauso guztiak aurrera eramatea, hain zuzen ere.
- **Helburua:** STL artxiboak sortzen dituen MatLab-eko script bat programatzea.
- **Entregatzekoa:** RGBtikSTLra.m script-a (ERANSKINAK dokumentuan ikusgai) eta 5 RGB irudien STL artxiboak.

3. Eginkizuna: STL-ei filtro ezberdinen aplikazioa. MeshLab (15 egun)

- **Deskribapena:** Aukeratutako filtroekin STL artxiboen leuntasun egoki bat lortzeko proba ezberdinak egin. Parametro eta iterazio ezberdinekin STL ezberdinen modifikazioa MeshLab bidez.
- **Helburua:** 5 irudien STL editatu eta hobetuak lortzea 3 filtroen aplikazioaren bidez.
- **Entregatzekoa:** Irudi bakoitzarentzat, 3 filtroak aplikatzean lortutako emaitza ezberdinak.

4. Eginkizuna: Filtro ezberdinen konparaketa eta aukeraketa. GOM Inspect (15 egun)

- **Deskribapena:** GOM Inspect programaren laguntzarekin, STL originalaren eta STL modifikatuaren arteko konparaketa, filtro egokiena izango litzatekena aukeratzeko histogramaren azterketaren bidez.
- **Helburua:** 3 filtroen artean emaitza egokienak lortzen dituen aukeratzea.
- **Entregatzekoa:** 5 irudien STL originala eta editatua konparatzen dituzten GOM Inspect programako proiektuak.

5. Eginkizuna: Probako maketaren inprimaketa (2 egun)

- **Deskribapena:** 5 Irudiaren 3Dko objektuaren inprimaketa burutzea Taubin filtroa aplikatutako STL artxibotik abiatuz.
- **Helburua:** Prozesuaren azken pausoa aurrera eramatea, proiektuaren emaitza den 3D objektua inprimatzea, hain zuzen ere.
- **Entregatzekoa:** Lortu den ukipenaren bidezko irakurmenerako objektua.

6. Eginkizua: Emaitzen analisia eta ondorioak (10 egun)

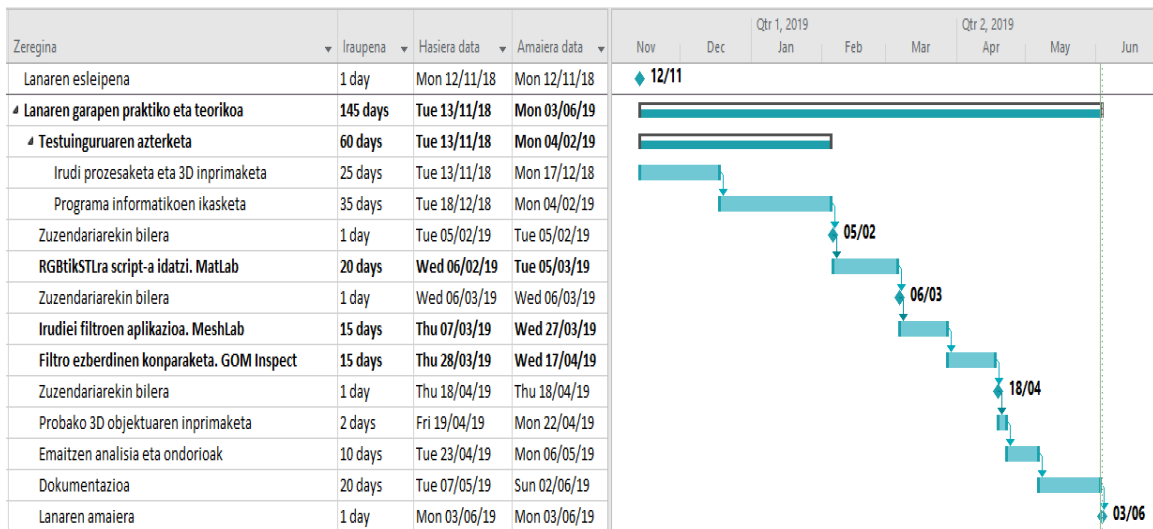
- **Deskribapena:** Hasierako helburuak lortu diren ikustea emaitzak analizatuz. Ondorioak atera.
- **Helburuak:** Ondorioak ateratzea emaitzak ikusita.
- **Entregatzekoa:** Proiektuan zehaztuko diren emaitzen analisiak.

7. Eginkizuna: Dokumentazioa idatzi (20 egun)

- **Deskribapena:** Lanaren dokumentazioa idaztea, behin prozesuaren metodologia guztia ezarri denean eta emaitzen ondorioak atera eta gero.
- **Helburua:** Proiektua dokumentatzea.
- **Entregatzekoa:** Gradu Amaierako Lanaren dokumentua.

8.2 GANTT diagrama

Aurreko atalean azaldu diren zeregin desberdinak Gantt diagrama batetan adierazi dira, lanaren eginkizunen garapen kronologikoa azaltzeko. Lanaren iraupen totala 145 egunekoa dela ondorioztatu da. Kontuan hartu behar da aipatutako 145 egun horietan lan egindako ordu kopurua ez dela guztietan berdina izan. Egin beharreko eginkizunaren arabera eta hilabetearen arabera (azterketak edo lan praktikak edukitzeak baldintzatzen du) ordu gehiago edo gutxiago eskaini zaizkio proiektuari. Baina hau kontutan hartuta, esan daiteke lanari dagozkion 6 kredituak gutxi gora-behera errespetatu direla.



8.1 Irudia. Gantt diagrama

9. LIMITAZIO ETA OZTOPOAK

Lana burutzean izandako arazoak eta aurkitutako limitazioak hainbat dira, proiektuaren konplexutasuna eta irudi ezberdinak aztertzeak suposatzen duen zailtasuna dela eta. Izan ere, mikroskopia bidez azertu daitezkeen ehun motak zenbaezinak dira, eta ondorioz lortu ditzazkegun irudiak oso ezberdinak izan daitezke. Arazo handiena beraz, irudi guztiei aplikagarria izan daitekeen metodologia bat sortzean egon da. Jarraian lana aurrera eramatean izandako oztopo ezberdinak azalduko dira.

Metodologian emandako arazo teknikoei dagokienez, reeskalaketa, filtroen aplikazioa eta prozesua aurrera eramateko denbora azpimarratu daitezke.

Inprimatzea posible izateko, hasierako RGB irudiari reeskalaketa bat aplikatu behar zaio, metodologia atalean azaldu den bezela. Reeskalaketa honek irudiaren tamaina aldatzean datza, eta ondorioz, informazio galera suposatzen du. Ordenagailuz ikusten den irudi batean, interesatzen zaigun eskualde baten anplifikazioa egin dezakegu, zehaztasun gehiagorekin azertu ahal izateko. 3Dko objektua inprimatzean, ordea, ez daukagu aukera hori. Reeskalaketa burututako tamainak limitatuko du lortu dezakegun informazio kantitatea.

Meshlabeko filtroei dagokienez, metodologia atalean azaldu den bezela, filtroen iterazio kopurua leuntasun egokia lortzeko argazkiaren ezaugarrien arabera izango da. Sinplifikatze aldera, argazkiak bi multzotan banatu dira, bi iterazio kopuru ezarriz, argazki motaren arabera. Baina honek prozesuaren metodologia orokor bat argazki guztientzat ezin lortu izatea dakar.

Prozesu guztia aurrera eramateko denbora ere kontuan izan behar da. Izan ere, mikroskopia elektronikoaren bidez argazkia lortzen denetik edota laginaren eskaneaketa egiten denetik 3Dko modelo lotzen den arte igarotako denbora kontuan hartzekoa izango da. STL artxiboaren sorkuntza prozesu azkarra da, ez ordea 3Dko objektuaren inprimatzea.

Arazo orokorrago bat lanaren emaitza edo arrakasta erabiltzailearen zenbait gaitasunen arabera limitatuta dagoela da. Izan ere, 3Dko modelo grafikoaren irakurketa erabiltzailearen ukipenerako ahalmenean bakarrik zentratzen da, beste zentzumenen (entzumena adibidez) laguntzarik ez duelarik. Honek informazioaren irakurketa mugatu dezake erabiltzaileak espazioaren pertzepzioa edota tamainen ezberdintzerako gaitasun egokia ez badauka.

10. ONDORIOAK ETA ETORKIZUNEKO LANA

10.1 Ondorioak

RGB irudietatik abiatuz 3Dko objektuak garatzeko metodoa baliagarria dela ondorioztatu daiteke. Nahiz eta garatutako metodoaren bidez lortzen diren emaitzek zenbait zailtasun eduki ukipenaren bidez interpretatzeko orduan, irudiaren irakurketa eta ideai orokor bat lortzeko baliagarria dela ondorioztatu da.

Burututako metodologia optimizatzeko eta lana borobilagoa izateko etorkizunean egin beharreko ekarpenak ere ondorioztatu dira:

- Interesgarria izango litzateke prozesu guztia, histologiako laginaren eskaneaketaren bidez irudia lortzetik, 3Dko objektua lortzerainoko lana bere osotasunean itsu batek egin ahal izatea. Hau da, ikusmen ezgaitasuna duen pertsonak autonomia osoz eta inungo dependentzia gabe, ukipenarekin irakur dezakeen maketa sortzea etorkizun batean egin daitekeen ekarpena da.
- Irudi guztientzat metodologia bakarra egite aldera, interesgarria izango litzateke filtroak aplikatzeko orduan irudi mota guztientzat egokia den eta emaitza onargarriak lortzen dituen filtro bat lortzea, iterazio kopuru uniformearekin irudi mota guztientzat. Informazio galeraren murrizketa eta leuntasunaren optimizazioa lortzen duen filtro eta iterazio kopurua lortzea izango litzateke helburua.
- Egindako lanean hasierako irudiari aplikatzen zaion reeskalaketa berdina da irudi guztientzat. Interesgarria izango litzateke irudi bakoitzaren arabera reeskalaketa pertsonalizatu bat egingo lukeen algoritmoa garatzea. Hau da, irudi batek bata bestetik oso gertu dituen zelula asko izan ditzake (odolaren Irudi 5 kasua) eta beste irudi batek, ordea, interesgarriak diren eskualdeak bata bestetik aldentuta. Ondorioz, odolaren motako irudien kasuan maketa handiagoa izango litzateke, ukipenaren bidez zelula ezberdinen arteko aldea desberdindu ahal izateko. Hain konplexuak ez diren irudietan, bestalde, tamaina txikiagoko reeskalaketa bat nahikoa izango zen ukipenaren bidez zonak desberdintzeko.

10.2 Etorkizuneko ekarpena. Aplikagarritasuna.

Etorkizuneko lanengan garatutako metodologiak egin ditzazken ekarpenen inguruan idatziko da jarraian. Lana biologia zelularreko irudien azterketan zentratu den arren, argi dago metodologia hau irudi mota ezberdinetan erabil daitekeela. Histologiako aplikagarritasunaren inguruan, mikroskopia elektroniko baten bitartez lortutako edota lagin ezberdinen eskaneaketaren bidez lortutako dena delako irudiei aplikatu daitekeen metodologia da, emaitza onargarriak lortuko direlarik. Aztertu ditugun 5 irudien jatorri ezberdina kontuan hartuta (odola, benak edota pankreas guruina bezelako konposizio desberdinak), histologian azter daitezkeen ehun mota guztiei aplikagarria den metodologia dela ondorioztatu daiteke. Beraz, ikerkuntza arloan etorkizun batean mikroskopia batek hartutako 2D irudiak inprimatu ahal izateko baliozkoa den metodologia da.

Ikerkuntzaren arloaz gain, hezkuntza munduan etorkizun batean erabilera izan dezake. Irakaskuntza esparruan pertsonaitsu edo ezgaitasun bisuala duten pertsonen limitazio handiak direla eta, kutsu didaktikoko aplikagarritasuna ere izan dezakeen lana da. Testu liburuek duten pisu bisual handia arintze aldera, ikusmen arazoak dituzten pertsonentzako irudi hauen 3Dko inprimaketak irakasteko prozesua asko erraztu dezake. Medikuntza, farmazia edota erizaintza bezelako graduetan ematen diren irakasgaietarako oso erabilgarria izan daiteke 3Dko objektuen aplikazioa.

Histologiaren arloa alde batera utziz eta ikuspuntu globalago bat hartuz, zientziaren arlo askotarako izan daiteke aplikagarria metodologia hau. Hala nola, 2Dko erliebeko mapa topografikoetatik abiatuz, geologian erabilgarriak izan daitezkeen paisaien maketak egiteko. Mendi, ibai edota hiriguneen 3Dko maketen inprimaketarako hedatu daiteke erabilera. Adibide gisa, *10.1 irudian* ikusi daiteke mendi lerro baten maketa.



10.1 Irudia. Mendi-lerro baten 3D objektua. Topographic map of Grand Teton, 2017.

11. ALDERDI EKONOMIKOAK

11.1 Taulan proiektua aurrera eramateko aurrekontua azaltzen da.

AURREKONTUA

BARNE ORDUAK			
	Orduak (h)	Unitateko Kostua (€/h)	Guztira (€)
Ingeniari Juniorra	300,00	25,00	7.500,00
Ingeniari Seniorra-Zuzendaria	40,00	70,00	2.800,00
Guztira A			10.300,00

AMORTIZAZIOAK				
	Kostua (€)	Bizitza Erabilgarria	Denbora Erabilgarria	Amortizatua (€)
Ordenagailu pertsonala	1500,00	5 urte	6 hilabete	150,00
MatLab	2000,00	3 urte	5 hilabete	277,77
MeshLab	0,00			0,00
GOM Inspect	0,00			0,00
Office Pack	150,00	1 urte	5 hilabete	62,50
3D Inprimagailua	30000,00	8 urte	20 h	8,68
Guztira B				498,95

BESTELAKO GASTUAK				
Kotsumo elektrikoa	Kostua (€/Kwh)	Denbora erabilgarria	Potentzia (Kw)	Guztira (€)
3D Inprimagailua	0,1244	20	4	9,95
Ordenagailua	0,1244	250	0,43	13,37
Besteak				
ABSplus termoplastikoa				10,00
Internerera konexioa				50,00
Ormazabal Gela				500,00
Guztira C				583,32

Ezusteak (%5)	569,10 €
A+B+C	11.382,27 €
A+B+C+ Ezusteak	11.951,37 €

BEZ (%21)	2.509,79 €
GUZTIZKOA	14.461,16 €

11.1 Taula. Lanaren aurrekontua

12. BIBLIOGRAFIA

Belén Medrano Garcia (2014) . Procesamiento de imagen con Matlab.

Chang, L. (2016). Tactile Picture Books Project uses 3D printing to make picture books for blind kids.

<https://www.digitaltrends.com/cool-tech/tactile-picture-books-project/> (accessed 2018.12.03)

Debbie Klassen (2016). A Consideration of the Implications of 3D Printing on Tactile Graphics to Support Literacy in Students with Visual Impairments

Dra. Silvia Ondategui-Parra, Prof. Francisco Gómez-Ulla de Irazábal (2012). Informe sobre la ceguera en España.

http://www.seeof.es/archivos/articulos/adjunto_20_1.pdf (accessed 2019.05.19)

Gom Inspect (2018). Precise Industrial 3D Metrology. Software for analyzing 3D measuring data.

<https://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html> (accessed 2019.04.29)

Greg J. Williams, Ting Zhang, Alexander Lo, Ashleigh Gonzales, D. Page Baluch, Bradley S. Duerstock (2014). 3D Printing Tactile Graphics for the Blind: Application to Histology

Instituto nacional de estadística (INE). Encuesta sobre Discapacidad, Autonomía Personal y Situaciones de Dependencia (EDAD 2008).

Jayant,C., Renzelmann,M., Wen,D., Krisnandi,S., Ladner,R., &Comden, D. (2007). Automated tactile graphics translation: In the field. In Proceedings of 9th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (Assets'07)(pp. 75–82). New York, NY: ACM.

MatLab (version R2016b (9.1.0)). 1984-2016 The MathWorks, Inc.

<https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed 2019.01.09)

MeshLab (version VCG-ISTI-CNR). 3D mesh processing software system.

<http://www.meshlab.net/> (accessed 2019.03.03)

Perlman, R. (2007). *The Blind Doctor: The Jacob Bolotin Story*. Santa Barbara, CA: Blue Point Books.

Sven Holcombe (2011). Stlwrite-write ASCII or Binary STL files (version 1.9.0.0) MathWorks- File exchange.

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20922-stlwrite-write-ascii-or-binary-stl-files> (accessed 2019.02.11)

Taubin, G. (1995). A Signal Processing Approach to Fair Surface Design. In Proceedings of the 22Nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (pp. 351–358). New York, NY: ACM.

TJ McCue (2019). STL Files: What They Are and How to Use Them. <https://www.lifewire.com/stl-files-2255> (accessed 2018.11.29)

Ting Zhang (2014) . Multimodal perception of histological images for persons blind or visually impaired

Topographic map of Grand Teton, Wyoming (2017).

<https://cults3d.com/en/3d-model/various/topographic-map-of-grand-teton-wyoming> (accessed 2019.4.12)

Watz, M. (2011). ModelBuilder Library.

<http://workshop.evolutionzone.com/2011/04/06/code-modelbuilder-librery-public-release/> (accessed 2018.11.29)

Wikipedia. STL File format (2019). [https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)) (accessed 2018.11.28)