

Konputagailuen Arkitektura eta Teknologia saila (KAT)



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

INFORMATIKA FAKULTATEA

**Nerbio-sistemaren aktibatzaileak  
identifikatzeko seinale fisiologikoen  
prozesamenduari aplikatutako Ikaskuntza  
Automatikoko teknikak**

**Nagore Sagastibeltza Galarragak**  
aurkeztutako Doktorego-Tesia

Zuzendariak  
**Asier Salazar Ramírez**  
**Javier Muguerza**

Donostia, Martxoak 2024

---

Konputagailuen Arkitektura eta Teknologia saila (KAT)



Universidad  
del País Vasco      Euskal Herriko  
Unibertsitatea

INFORMATIKA FAKULTATEA

# Nerbio-sistemaren aktibatzaileak identifikatzeko seinale fisiologikoen prozesamenduari aplikatutako Ikaskuntza Automatikoko teknikak

Nagore Sagastibeltza Galarragak  
aurkeztutako Doktorego-Tesia

Zuzendariak  
**Asier Salazar Ramírez**  
**Javier Muguerza**

Donostia, Martxoak 2024

---

Lan hori partzialki finantzatu zuen PID2021-123087OB-I00 dirulaguntzak,  
MCIN/AEI/10.13039/501100011033 eta Eskualde Garapeneko Europako Funtsak (ERDF)  
emandakoak, Europa indartzeko ekimen baten zati gisa. Eusko Jaurlaritzako Hezkuntza,  
Unibertsitate eta Ikerketa Sailaren laguntza ere izan zuen (ADIAN, IT-1437-22).

---

*“Bizitza ez da erraza gutako inorentzat.  
Pertseberantzia eta, batez ere,  
konfiantza izan behar dugu geure buruarengan.  
Zerbitetarako prest gaudela sinetsi behar dugu,  
eta hori lortu egin behar da.”*

Marie Curie

---

# Eskerrak

- Lehenik eta behin, eskerrak eman nahi dizkiet nire tutoreari eta tesi-zuzendariei laguntza handia emateagatik. Eskerrik asko Asier eta Javi. Eskutik helduta eraman nauzue denbora guztian, eta, zalantzarik gabe, zuengatik izan ez balitz, niretzat lan hau askoz zailagoa izango zen, eta ezinezkoa esatera ere ausartuko nintzateke.
- Esker on berezia Raqueli eman nahi diot. Zu gabe, nagoen prozesu osoa ez zen posible izango. Nitaz fidatu zinen halako zerbait jada bideragarria ez zela pentsatzen nuen une batean. Zuekin, talde bikaina alderdi guztietan, lan egiteko eta berriro aktibo egoteko ametsa gauzatu ahal izateko aukera eman zenidan. Eskerrik asko Raquel.
- ALDAPA ikerketa-taldeari ere eskerrak. Eskerrik asko zuetako bakoitzari: Javi, Asier, Raquel, Ainhoa, Natxo, Andoni, Olatz, Txus, Ibai, Iñigo, Jodra eta Maitane. Eskerrik asko egin duzuen moduan neu hartzeagatik, laguntzeagatik eta taldeko beste kide bat izateko aukeragatik. Eskerrik asko Natxo azken irakurketa egitea onartzeagatik.
- Eskerrik asko Gurutzetako Unibertsitate Ospitaleko eta Biocruceseko ikerketa-taldea osatzen duten pertsoneri, hori guztia posible izan dadin. Eskerrik asko Cesarri eta UPV/EHUko irakasleei. Zuekin partekatu ditut nire hastapenak, eta eskerrak eman nahi dizkidazue eman didazuen laguntzeagatik eta errefortzu pertsonal eta laborlagatik.
- Eskerrak ere eman nahi dizkiot tesi honen epaimahaiari, ni babesteko egingadako ahaleginagatik eta hain azkar parte hartzea onartu izanagatik.
- Eskerrik asko *Helgueras City* nire lagun taldeari. Mila esker poztasun uneak nirekin partekatzeagatik eta indarrak ahultzen diren uneetan neu erortzen ez uzteagatik. Soilik esan ahal dizuet ESKERRIK ASKO eta... taldean bi doktore dauzkagula!
- Mila esker nire lagun Sheila, Evelyn eta Aitorri. Eskerrik asko nigan sinesteagatik eta bizitzan sortzen den edozein arazo konpontzeko zuekin kontatuz deza kedala erakusteagatik. Beti nirekin kontatu ahal izango duzue!!
- Eskerrik asko Soniari. Beti eskaintzen didazun prestutasunari esker, prozesu hau askoz errazagoa izan da.

- 
- Eskerrik asko Karmen eta Fernandori. Zuen denbora nire tesiaren irakurketan inbertitzeagatik. Niretzat laguntza handia izan da.
  - Eskerrik asko, Tito. Eskerrik asko nigatik egiten duzun guztiagatik, eskerrik asko nire familiaren parte izateagatik. Inoiz ez dut nahikoa eskertuko nire bizitzan zeu agertu izana.
  - Mila esker nire neba Ikerri. Oso berezia zara niretzat. Eskerrik asko zaren bezalakoa izateagatik, gehiago ezin dudala sentitzen dudan uneetan ere nire zain egoteagatik. Zu bakarrik izan zitekeen nire tesia irakurtzen lehena.
  - Eskerrik asko nire bizi-lagunari. Eskerrik asko, Edorta. Gai sentiarazten nauzu proposatzen didan edozein helburu lortzeko. Elkarrekin dena askoz errazagoa da, dena askoz hobea. Nire apusturik onena zinen, aukerarik onena. Egurre!!!
  - Eskerrik asko nire semea Aratzi eta nire alaba Laiari. Nire bizitza elikatzen duen bateria zarete, dena aurrera jarraitzeko arrazoia zarete. Zeuek amaz harro sentitzea espero dut, aski dut zuetaz zein harro nagoen milaren bat.
  - Eskerrik asko ama zure baldintzarik gabeko maitasunagatik, zure etengabeko laguntzagatik eta egin behar izan dituzun sakrifizioengatik. Aukeraz beteriko bizitza niri emateko egin dituzun ahalegin guztiengatik. Eskerrik asko aita eta ama izateagatik. Eskerrik asko guztiagatik.
  - Ezin nituzke esker on hauek beste era batera amaitu. Eskerrik asko, aita. Hainbeste denbora igaro da, faltan botatzen zaitut. Azkenean arrazoi zenuen: Lortu dut!



# Laburpena

Gaur egun, osasunaren ikusmoldea pazientearen ongizate integralera hedatu da, eta haren irismena gaixotasunik eza hutsetik haratago dago, alderdi fisikoak, mentalak eta sozialak barne hartuz. Osasun-sistemaren eskakizun aldakorren aurrean, ingeniartzak eta konputazio-zientziek diagnostiko medikoak hobetzeko eta gaixotasunen detekzioaren kostuak murrizteko teknologiak garatzera bideratuta daude, medikamentu berritzaileen garapenetik hasi eta prebentzio-medikuntzako programetaraino. Helburu horiek lortzeko, konputazio fisiologikoaren esparruko ikerketa-talde batzuek seinale fisiologikoetan patroiak identifikatzen dituzten sistema informatikoak sortzen dituzte. Aplikazio eta sistema horien erabilera diagnostiko medikotik haratago doa, eta pertsonen egoera mentalak eta emozionalak identifikatzeko eta detektatzeko ere baliagarriak dira. Horrela, agerian geratzen da medikuntzaren eta ingeniartzaren munduen arteko diziplinarteko lankidetzaren garrantzia, eta bi diziplina horien arteko sinergiak bilatzeko beharra azpimarratzen da, prebentzioaren, detekzio goiztiarraren eta gaixotasunen diagnostikoaren arloan gizarte-, klinika- eta teknologia-mailan aurrerapen esanguratsuak bultzatzeko.

Testuinguru horretan, tesi honek, funtsean, bi ikerketa-ildo jorratzen ditu. Lehenengoa, bizkarrezur-muineko lesio zerbikalak edo dorsal altuak dituzten pazienteen disreflexia autonomoko gertakariak hautematera bideratzen da. Muineko lesio baten ondoren, neurona sinpatikoak erregulatzen dituzten zirkuitu lokaletan aldaketa plastikoak ikusten dira. Ildo horren helburu nagusia Ikaskuntza Automatikoan oinarritutako sistema bat garatzea da, bizkarrezur-muineko lesioak dituzten pazienteen disreflexia autonomoaren hasierako diagnostikoaren erronkari aurre egiteko, diagnostiko horretarako metodo inbaditzaileak erabiltzeko beharra minimizatzen. Helburu hori betetzeko, diagnostikoa bi mailatan banatzen duen sailkapen hierarkikoko sistema bat proposatzen da, modu ez-inbaditzailean ateratako ezaugarriak soilik erabiliz. Laburbilduz, ildo horretan egindako ekarpenak hipotesi hau planteatzen du: bideragarria da gaixotasunaren hasierako diagnostikoa Machine Learning eta ezaugarri ez-inbaditzaileetan oinarritutako sistemen bidez egitea.

Bestalde, bigarren ikerketa-ildoan egoera mentalen detekzio automatikoan oinarritzen da. Ildo horren abiapuntua da aldaketa emozionalek, batez ere estres-egoeretan eta erlaxazio-egoeretan, zuzenean eragiten diotela gizabanako baten nerbio-sistema autonomoari. Nerbio-sistema autonomoak hain sentsibilitate handia duenez, pertsona bat lasaitzen denean gertatzen diren aldaketa fisiolo-

---

gikoak desberdinak izaten dira, egoera estresagarri edo lasai batean gertatzen diren kontuan hartuta. Hori horrela izanik, ikerketa-lerro hau egoera konkretu baten barruan (kasu honetan, erlaxazioarena) azpiegoera emozionalak automatikoki hautematean eta identifikatzean oinarritzen da.

# Resumen

En la actualidad, la concepción de la salud se ha expandido hacia el bienestar integral del paciente, reconociendo su alcance más allá de la mera ausencia de enfermedades, incluyendo aspectos físicos, mentales y sociales. Ante las cambiantes exigencias del sistema sanitario, la ingeniería y las ciencias de la computación están orientadas hacia el desarrollo de tecnologías que mejoren diagnósticos médicos y reduzcan costos en la detección de enfermedades, abarcando desde el desarrollo de medicamentos innovadores hasta programas de medicina preventiva. Para alcanzar estos objetivos, algunos grupos de investigación del ámbito de la computación fisiológica se dedican a crear sistemas informáticos que identifiquen patrones en las señales fisiológicas. El uso de estas aplicaciones y sistemas no solo va más allá del propio diagnóstico médico, sino que también son de utilidad para la identificación y detección de estados mentales y emocionales de las personas. De esta manera, queda patente la importancia de la colaboración interdisciplinaria entre los mundos de la medicina y la ingeniería, enfatizándose en la necesidad de buscar sinergias entre estas dos disciplinas para impulsar avances significativos a nivel social, clínico y tecnológico en el ámbito de la prevención, detección temprana y diagnóstico de enfermedades.

En este contexto, esta tesis aborda fundamentalmente dos líneas de investigación. La primera se enfoca en la detección de episodios de disreflexia autónoma en pacientes con lesiones medulares cervicales o dorsales altas. Tras una lesión medular, se observan cambios plásticos en los circuitos locales que regulan las neuronas simpáticas. El objetivo principal de esta línea es desarrollar un sistema basado en Aprendizaje Automático para abordar el desafío del diagnóstico inicial de la disreflexia autónoma en pacientes con lesiones medulares, de manera que se minimice la necesidad de usar métodos invasivos para dicho diagnóstico. Para cumplir este objetivo, se propone un sistema de clasificación jerárquica que divide el diagnóstico en dos niveles, utilizando únicamente características extraídas de manera no invasiva. En resumen, la contribución realizada en esta línea plantea la hipótesis de que es viable realizar el diagnóstico inicial de la enfermedad mediante sistemas basados en Machine Learning y características no invasivas.

Por otra parte, la segunda línea de investigación se centra en la detección automática de estados mentales. Esta línea parte de la premisa de que los cambios emocionales, especialmente en situaciones de estrés y relajación, afectan

---

directamente al sistema nervioso autónomo de un individuo. El sistema nervioso autónomo tiene una sensibilidad tan grande que los cambios fisiológicos que se producen cuando una persona se relaja son diferentes dependiendo de si estos se dan dentro de una situación estresante o de carácter tranquilo. Siendo así, esta línea de investigación se centra específicamente en la detección e identificación automática de diferentes subestados emocionales dentro de un estado concreto: el de la relajación.

# Abstract

Currently, the conception of health has expanded towards the comprehensive well-being of the patient, recognizing its scope beyond mere absence of diseases, including physical, mental, and social aspects. Given the changing requirements of the healthcare system, engineering and computer sciences are orientating towards the development of technologies that improve medical diagnostics and reduce costs in disease detection, covering a variety of situations that may go from the design of innovative drugs to the development of whole preventive medical programs. To achieve these goals, some research groups in the field of physiological computing are dedicated to creating computer systems that identify patterns in physiological signals. The use of these applications and systems goes beyond the mere medical diagnosis and are also useful for identifying and detecting people's mental and emotional states. This way, the importance of interdisciplinary collaboration between the worlds of medicine and engineering becomes evident, emphasizing the need to seek synergies between these two disciplines in order to produce significant social, clinical, and technological progress in disease prevention, early detection and diagnosis.

In this context, this thesis essentially deals with two research lines. The first focuses on the detection of episodes of autonomic dysreflexia in patients with cervical or high dorsal spinal cord injuries. After suffering a spinal cord injury, the local circuits that are regulated by sympathetic neurons may also suffer plastic changes. The main goal of this line is to develop a Machine Learning-based system to address the challenge of the initial diagnosis of autonomic dysreflexia in patients with spinal cord injuries, minimizing the need to use invasive methods for such diagnosis. To achieve this objective, this thesis proposes using a hierarchical classification system that divides the diagnosis into two levels and that only uses features that can be extracted non-invasively. In summary, the contribution made in this line poses the hypothesis that it is possible to perform the initial diagnosis of the disease through Machine Learning-based systems and non-invasive features.

On the other hand, the second research line focuses on the automatic detection of mental states. This line starts with the premise that emotional changes, especially in situations of stress and relaxation, have a direct impact on the individual's autonomic nervous system. The autonomic nervous system has such a high sensitivity that the physiological changes that occur when a person relaxes are different depending on whether they occur in a stressful or calm

---

situation. Thus, this line of research specifically targets the automatic detection and identification of different emotional substates within a specific mental state: relaxation.

# Aurkibidea

<b>I. HITZAURREA</b>	<b>xxv</b>
1. Konputazio fisiologikoaren sarrera . . . . .	1
1.1. Tesiaren antolaketa . . . . .	2
<b>II. AURRETIKOAK</b>	<b>5</b>
2. Giza Gorputzaren Anatomia eta Fisiologia . . . . .	7
2.1. Hitzaurrea . . . . .	7
2.2. Giza gorputzaren sistema organikoak eta funtzioak . . . . .	8
2.2.1. Tegumentario aparatua . . . . .	9
2.2.2. Gernu-sistema . . . . .	10
2.2.3. Sistema kardiobaskularra . . . . .	12
2.2.4. Nerbio-sistema . . . . .	19
2.3. Disreflexia Autonomoa . . . . .	27
2.4. Egoera emozionalak . . . . .	29
2.4.1. Emozioak . . . . .	30
2.4.2. Estresa . . . . .	31
2.4.3. Erlaxazioa . . . . .	33
3. Seinale fisiologikoak . . . . .	35
3.1. Sarrera . . . . .	35
3.2. Elektrokardiograma . . . . .	35
3.3. Presio arteriala . . . . .	37
3.4. Jarduera elektrodermikoak . . . . .	39
3.5. Bihotzeko inpedantzia . . . . .	41
4. Ikaskuntza Automatikoan oinarritutako teknikak . . . . .	45
4.1. Hitzaurrea . . . . .	45
4.2. Ikaskuntza Automatikoa . . . . .	46
4.3. Gainbegiratutako Ikaskuntzako algoritmoak . . . . .	47
4.3.1. One Rule (1R) . . . . .	48
4.3.2. Decision Tree (DT) . . . . .	49

4.3.3.	Zuhaitzetan oinarritutako askotariko sailkapen-sistemak . . . . .	51
4.3.4.	k Nearest Neighbours (k-NN) . . . . .	56
4.3.5.	Naïve Bayes (NB) . . . . .	58
4.3.6.	Support Vector Machines (SVM) . . . . .	59
4.3.7.	Logistic Regression (LR) . . . . .	62
4.3.8.	Sare Neuronal Artifizialak (SNA) . . . . .	64
4.4.	Ereduen ebaluazioa eta baliozkotzea . . . . .	69
4.4.1.	Datuak zatitzeko metodologiak . . . . .	69
4.4.2.	Errendimendu-metrikak . . . . .	73
4.5.	Garrantziaren analisia. Test estatistikoak . . . . .	81
 <b>III. EKARPENAK</b>		<b>87</b>
 <b>5. Ikaskuntza Automatikoak disreflexiaren diagnostikoari egindako ekarpenak . . . . .</b>		<b>89</b>
5.1.	Hitzaurrea . . . . .	89
5.2.	Datu-bilketa . . . . .	90
5.3.	Datuak aurreprozesatzea eta seinaleak iragaztea . . . . .	92
5.4.	DA duten pazienteen disautonomia-mailaren analisi kuantitatiboa	93
5.4.1.	Datuak bistaratzea . . . . .	93
5.4.2.	Datuen analisi estatistikoa . . . . .	95
5.4.3.	Analisi kuantitatiboaren emaitzak eta ondorioak . . . . .	95
5.5.	Disreflexia autonomoaren diagnostiko ez-inbaditzailea egiteko sistema hierarkikoa . . . . .	96
5.5.1.	Ezaugarriak ateratzea . . . . .	97
5.5.2.	Sailkapen-tresnaren konfigurazio esperimentalak . . . . .	101
5.5.3.	Emaitzak . . . . .	101
5.5.4.	Ondorioak . . . . .	106
 <b>6. Ikaskuntza Automatikoaren ekarpenak egoera emozionalak detektatzeko . . . . .</b>		<b>109</b>
6.1.	Hitzaurrea . . . . .	109
6.2.	Datu-bilketa . . . . .	110
6.2.1.	Konfigurazio esperimentalak . . . . .	110
6.2.2.	Ezaugarriak ateratzea . . . . .	112
6.3.	Sailkapen-tresnaren diseinua . . . . .	117
6.3.1.	Hasierako ikuspegia . . . . .	117
6.3.2.	Azken ikuspegia . . . . .	121
6.3.3.	Erreferentziako datu-base batekin sailkatzeko tresnaren proba . . . . .	126
6.4.	Aplikazio praktikoak . . . . .	129
6.5.	Ondorioak . . . . .	130



<b>IV. ONDORIOAK</b>	<b>131</b>
<b>7. ONDORIOAK</b>	<b>133</b>
7.1. Ondorioak	133
7.2. Patologiak detektatzeko informazio fisiologikoa eta Ikaskuntza Automatikoko teknikak	134
7.3. Egoera emozionalak detektatzeko informazio fisiologikoa eta Ikas- kuntza Automatikoko teknikak	135
7.4. Etorkizuneko lan-ildoak	137
7.5. Argitalpenak	138
<b>V. ERANSKINAK</b>	<b>141</b>
<b>8. Disreflexia Diagnostikoaren Emaitzak eta Ondorio Medikoak</b>	<b>143</b>
8.1. Emaitzak	143
8.2. Ondorioak	150
<b>Bibliografia</b>	<b>153</b>



# Irudien aurkibidea

2.1. Izerdi-guruinak. . . . .	10
2.2. Gernu-aparatua. . . . .	11
2.3. Maskuria. . . . .	12
2.4. Odol-konposizioa. . . . .	13
2.5. Odol-hodien sailkapen anatomikoa. . . . .	14
2.6. Giza gorputzaren arteria eta zain nagusiak. . . . .	16
2.7. Bihotzaren kokapena giza gorputzean. . . . .	17
2.8. Bihotzaren barne-egiturak. . . . .	18
2.9. Bihotzaren funtzionamendua. . . . .	19
2.10. Neurona edo nerbio-zelula baten zatiak. . . . .	20
2.11. Nerbio-sistema zentralaren eta periferikoaren osagaiak . . . . .	21
2.12. Zuntz sinpatiko aferenteen eta eferenteen jatorria eta banaketa. . . . .	24
2.13. Zuntz parasinpatiko aferenteen eta eferenteen jatorria eta banaketa. . . . .	25
2.14. Sistema sinpatikoaren eta parasinpatikoaren funtzioak. . . . .	26
2.15. Prozesu disreflexikoaren eskema. . . . .	28
2.16. Egokitzen Sindrome Orokorren (SGA) irudikapen grafikoa. . . . .	32
3.1. 3 eta 5 deribazioko elektrodoak jartzea. . . . .	36
3.2. Elektrokardiograma (EKG). . . . .	36
3.3. Ondoz ondoko taupadetan jasotako presio arteriala. . . . .	38
3.4. EDA jasotzeko elektrodoak jartzea. . . . .	39
3.5. EDA seinale fisiologikoa bere bi osagaiekin. . . . .	40
3.6. Elektrodo tetrapolarren sistema. . . . .	41
3.7. Toraxaren eredu zilindriko sinplifikatua. . . . .	42
3.8. Inpedantzia-kardiografiaren trazadura eta uhinak. . . . .	43
4.1. Sailkapen- eta erregresio-arazoen irudikapen grafikoa. . . . .	47
4.2. Tratamendu medikoen aplikazioari buruzko erabaki-zuhaitza erai- kitzeko adibidea. . . . .	50
4.3. Baggingen algoritmoaren egituraren adibidea. . . . .	52
4.4. AdaBoost algoritmoa entrenatzeko jatorrizko datuak . . . . .	53
4.5. AdaBoost algoritmoak sortutako sailkatzaile errazak . . . . .	53
4.6. AdaBoost algoritmoarekin lortutako azken sailkatzailea . . . . .	54
4.7. Random Forest algoritmoaren funtzionamendua. . . . .	55

4.8. k-NN metodoa erabiliz sailkatzeko prozedura. . . . .	57
4.9. Sailkapen prozesua Naïve Bayes algoritmoaren bidez. . . . .	59
4.10. Sailkapen optimoa euskarri-bektoreen makinekin (SVM). . . . .	60
4.11. Sailkapen optimoa euskarri-bektoreen makinekin (SVM) erregula- rizazio-teknika aplikatuta. . . . .	61
4.12. Sailkapen optimoa euskarri-bektoreen makinekin (SVM) Kerne- len transformazio-teknika aplikatuta. . . . .	62
4.13. Erregresio Logistikoarekin (LR) sailkatzea funtzio logistikoaren edo sigmoidearen bidez. . . . .	63
4.14. Sare neuronal artifizialaren egitura. . . . .	64
4.15. Perzeptroi multigeruza (MLP) sare baten oinarritzko arkitektura. . . . .	65
4.16. Oinarri Erradialeko Sarea (RBF) algoritmoaren bidezko sailkapen- prozesuaren egitura. . . . .	67
4.17. Sare neuronal artifizial tradizional eta sakon baten adibidea. . . . .	68
4.18. Datu guztien ausazko banaketa bi bloketan. . . . .	70
4.19. Datu guztien ausazko banaketa hiru bloketan. . . . .	70
4.20. K-fold metodoaren funtzionamendu-metodologia. . . . .	71
4.21. Bootstrap metodologia: datuen laginketa-prozesua ordezkapena erabiliz. . . . .	73
4.22. Nahaste-matrizea. . . . .	74
4.23. AUC 1. adibidea. . . . .	79
4.24. AUC 2. adibidea. . . . .	79
4.25. AUC 3. adibidea. . . . .	80
4.26. AUC 4. adibidea. . . . .	80
4.27. t-BC banaketa. 1. adibidea: ia beti $\Delta acc < 0$ . . . . .	84
4.28. t-BC banaketa. 2. adibidea: ia beti $\Delta acc > 0$ . . . . .	84
4.29. t-BC banaketa. 3. adibidea: ia beti $-0.1 < \Delta acc < 0.1$ . . . . .	85
5.1. Esperimentu-etapak. . . . .	91
5.2. Lagineko subjektuetako baten jatorrizko seinalea aurrez proze- satzea eta iragaztea. . . . .	93
5.3. Esperimentuaren hirugarren fasean jasotako seinale fisiologikoak bistaratzeta. . . . .	94
5.4. Presio arterial sistolikoaren bilakaera paziente disreflexikoetan eta patologia hori jasaten ez dutenetan. . . . .	95
5.5. Proposatutako sailkapen hierarkikoko sistemaren egitura. . . . .	105
6.1. Parte-hartzaile batengandik esperimentuan zehar lortutako RR eta EDA seinaleak, detektatutako RRespekin batera. . . . .	112
6.2. Poincaréren sakabanatze-diagrama egitean lortutako elipsearen adibidea. . . . .	115
6.3. Bikoteka egindako alderaketaren emaitzak, BC testa eta puzzlea- ren datu-basearen 50 ezaugarriak erabiliz. . . . .	119
6.4. AdaB vs. Bag konparaziorako ondorengo PDFa. . . . .	120
6.5. RR_Band ezaugarriak RR seinalearen anplitudea diskretizatzen du hiru bandatan. . . . .	122

6.6. Bikotekako alderaketaren emaitzak, BC testa erabiliz, RR_Band ezaugarria puzzlearen datu-basearen beste 50 ezaugarriei gehitu ondoren. . . . .	123
6.7. Sailkatzaile onenen nahaste-matrizeak, puzzlearen datu-basea erabiliz. . . . .	125
6.8. WESAD datu-basearen erregistro baten seinaleak. . . . .	127
6.9. Batezbesteko nahaste-matrizea AdaB algoritmoarentzat, WESAD datu-basea erabiliz. . . . .	128
8.1. Presio arteriala handitzeko eredua, gatz disoluzioarekin 37°C-tan maskuria betetzen den bitartean. . . . .	148
8.2. Erreflexu barohartzailearen sentsibilitatea neurketa atsedenean, oreka sinbobagala eta noradrenalina eta basopresina zinetikoa, disreflexia autonomikoarekiko eta gabeko bizkarrezur-muineko lesioa duten pazienteengan. . . . .	149



# Taulen aurkibidea

5.1. Pazienteen historial klinikotik ateratako ezaugarriak. . . . .	98
5.2. Esperimentuaren hormona-zati (odol-analitika) ez-inbaditzailearen jatorri fisiologikoko ezaugarriak. . . . .	98
5.3. Esperimentuko bioseinaleak biltzeko zati ez-inbaditzailearen jatorri fisiologikoko ezaugarriak. . . . .	99
5.4. Sailkatzaile onena zenbatestea historial klinikoaren ezaugarrien azpiespazioa erabilita. . . . .	102
5.5. Sailkatzaile onena zenbatestea metodo ez-inbaditzaileen bidez ateratako ezaugarri fisiologikoen azpiespazioa erabilita. . . . .	103
5.6. Sailkatzaile onena zenbatestea ezaugarri kliniko eta fisiologiko ez-inbaditzaileen azpiespazio konbinatua erabilita. . . . .	103
5.7. Bi mailatako sailkatzaile hierarkikoaren ebaluazioa. . . . .	105
5.8. Leave-one-out metodologia erabiliz sailkatzaile hierarkikoaren emaitzak. . . . .	106
6.1. Aztertutako leiho bakoitzetik ateratako denbora-eremuko ezaugarriak. . . . .	114
6.2. Sailkatzailearen probaren errendimenduak, puzzlearen datu-basearen 50 ezaugarriak erabiliz. . . . .	118
6.3. Sailkatzailearen probaren errendimenduak, CFS algoritmoak puzzlearen datu-baserako hautatutako 11 ezaugarriak bakarrik erabiliz. . . . .	121
6.4. Sailkatzailearen probaren errendimenduak, puzzlearen datu-multzoaren beste 50 ezaugarriei RR_Band ezaugarria gehitu ondoren. . . . .	123
6.5. Sailkatzailearen probaren errendimenduak, RR_Band ezaugarria gehitu ondoren eta soilik CFS algoritmoak puzzlearen datu multzorako hautatutako 6ak erabiliz. . . . .	124
6.6. Sailkatzailearen probaren errendimenduak WESAD datu-basea erabiliz. . . . .	127
8.1. Sintomen prebalentzia, Autonomic Standards Assessment Form (ASAF) erabiliz neurtua. . . . .	144
8.2. Demografia, datu klinikoak eta neurketa autonomikoak, disreflexia autonomikoa duten eta ez duten BMLko pazienteei dagokienez. . . . .	146





I. Zatia

# HITZAURREA



# 1. Kapitulua

## Konputazio fisiologikoaren sarrera

Azken urteotan, osasuna ikuspegi berriak hartzen ari da, bere ikuspegia pazientearen ongizate fisikora eta emozionalera bideratuz. Osasunaren Mundu Erakundeak (OME) dioen bezala, osasuna ez da soilik afekzio edo gaixotasunik eza, baizik eta erabateko ongizate fisiko, mental eta soziala [1]. Osasun-sistemak teknologia berriak sartzea eskatzen du: sendagai eta prozedura diagnostiko berriak, konplexutasun handiko ekipoak, txertaketa-kanpainak eta prebentzio-medikuntzako planak. Behar berri horiek ikusita, gero eta joera handiagoa dago ingeniariaren eta konputazio-zientzien arloan, tresna berriak garatzera bideratuta, ekipo medikoei diagnostiko hobeak lortzen edo gaixotasunak detektatzeko prozesuen kostuak murrizten laguntzeko.

Ildo horretan, konputazio fisiologikoko zenbait ikerketa-talde beren ahaleginak pazienteen seinale fisiologikoetan patroiak identifikatu eta sailkatu ditza-keten sistema informatikoak diseinatzera bideratzen ari dira. Sistema horiek lagungarriak izan daitezke medikuntza tradizionalan, gaixotasunen edo nahas-menduen diagnostikoan eta helburu psikologikoetan, hala nola egoera mentalen edota emozionalen identifikazioan, organismoan gertatzen den informazio fisiologikoaren interpretazio automatikoa emanez.

Tesian aurkeztutako lanak bi lerro nagusi lantzen ditu. Lehenengo lerroa disreflexia-gertakarien detekzioa aztertzeari buruzkoa da. Bizkarrezur muineko disreflexia sinpatiko edo disreflexia autonomikoa larritasun-koadro klinikoa da, eta ohikoa da bizkarrezur muineko lesio zerbikalak edo dorsa altuak dituzten pazienteetan (D5en gainera [2, 3]), haien prebalentzia %50etik gorakoa baita [4, 5] eta %90eko intzidentzia. Muineko lesio baten ondoren, normalean D5 segmentu-mailaren gainera, tronkoentzefalo-egituretatik eta dientzefalikoetatik datorren fluxu sinpatikoa galtzen da. Denborarekin, aldaketa plastikoak gertatzen dira neurona sinpatikoak kontrolatzen dituzten zirkuitu lokaletan [5, 6].

Beste ikerketa-ildoak hipotesi batetik abiatzen da, organismoak, aldaketa emozionalen aurrean, zehazki estres- eta erlaxazio-egoeren aurrean, erreflexu

zuzena du subjektuaren nerbio-sistema autonomoan (NSA), bai sistema sinpatikoan bai parasinpatikoan, garun-mailan jasotako pertzepzioaren arabera. NSAREN sentzibilitatea hain zehatza da, non, esate baterako, estres-egoera batean erlaxazioan erantzuteak lasaitasun-egoera batean sortzen denaz bestelako erantzun fisiologiko bat sortzen baitu.

Tesi honetan aurkeztutako lanaren helburua egoera fisikoak (patologiak eta disreflexia) zein emozionalak (erlaxazioa eta estresa) automatikoki detektatzea eta identifikatzea da. Erlaxazioaren azterketan lortutako emaitzek, adibidez, lagunduko diote pertsonari identifikatzen noiz lasaitzen den eta zer mailatan. Horrek psikologia positiborako egungo joera eta osasunaren ikuspegia lagun ditzake egoera positiboak indartzen. Erlaxazio-mailak identifikatzen dituen tresna bati esker, pertsonari lagundu ahal izango zaio egoera horiek sortzen, noiz bizi dituen identifikatzen, zer tresnak errazten dioten ongizatea jakiten eta nor bere burua hobeto ezagutzen. Tresna horren bidez, errehabilitazioak desgaitasun kognitiboa duten pertsonengan dituen ondorio positiboak edo negatiboak egiazta daitezke, estres-mailak detektatzeari esker, kontzentrazioa eskatzen duten jarduerak egiten dituzten bitartean. Disgogoetaren azterketan lortutako emaitzei dagokienez, bizkarrezur muineko lesionatu batek egoera disreflexikoak sortzeko erraztasun handiena noiz duen identifikatzen lagunduko dute. Egoera horiek aurreikusteko eta horiei aurrea hartzeko aukera izango dute, gerta ez daitezen eta, horrela, lehen aipatutako lesioa duen paziente batengan eragin ditzaketan ondorio larriak saihesteko.

### 1.1. Tesiaren antolaketa

Tesia, gauden sarrera atalaz gain, hiru bloketan egituratu da. II. Zatiak ondorengo atalen oinarri izango diren aurrekariak deskribatzen ditu, tesi honetan aurkeztutako ekarpenak ulertu ahal izateko oinarritzko ezagutzak baitira. Multzo honetan, giza gorputzaren anatomiarekin eta fisiologiarekin lotutako alderdiak, seinale fisiologikoak, gaixotasun neurodegeneratiboak (DA), egoera emozionalak eta Ikaskuntza Automatikoko teknikak (Machine Learning, ML) deskribatzen dira.

III. Zatian tesi honen oinarri diren ekarpenak aurkezten dira. Era berean, atal hau bi kapitulutuan banatu da, eta horietan tesi honen hiru ekarpenetako bakoitza deskribatuko da. 5. Kapituluak, alde batetik, bizkarrezur-muinean lesioa duten pazienteetan DAREN presentzia identifikatzeko Biocruces Bizkaia Osasun Ikerketa Institutuarekin (IIS-BB) egindako lana aurkezten du, gaixotasun horren ondoriozko konplikazio larrien tasa murrizteko helburuarekin. Bestalde, lehen aipatutako lanaren jarraipena azaltzen da. Bertan, DA gertakarien agerpena hautemateko helburua Ikaskuntza Automatikoko teknikak edo Machine Learning aplikatzean oinarritzen da. III. Zatia 6. Kapituluarekin amaitzen da; kapitulu horretan, erlaxazio-erantzunetan egoera mentalaren detekzio automatikoari buruz egindako lana aurkezten da.

Azkenik, IV. Zatian tesia egiteko prozesuan ateratako ondorioak aurkeztuko dira. Ondorioen 7. Kapituluak hiru ataletan banatu da: 7.1. Atala, tesian aur-

## 1.1. TESIAREN ANTOLAKETA

---

keztutako lan guztien ondorioak deskribatzen dituen; 7.4. Atala, tesi honetan jorratutako aztergaiei buruz egindako ikerketan sortu diren mugak eta etorkizuneko lan-ildoak azaltzen dituen; eta, amaitzeko, 7.5. Atala, tesi honekin lotura zuzena duten kongresu eta inpaktu-indizeak dituzten aldizkarietan argitaratutako lanak zerrendatzen dituen.

## 1. KAPITULUA - KONPUTAZIO FISIOLÓGIKOAREN SARRERA

---

**II. Zatia**

**AURRETIKOAK**





## 2. Kapituluia

# Giza Gorputzaren Anatomia eta Fisiologia

### 2.1. Hitzaurrea

Lan honen 1. Sarreran planteatu den bezala, osasun-sistemak teknologia berriak eskatzen ditu pazientearen ongizate fisikoa, psikologikoa eta emozionala lortzeko. Helburu horri begira, beharrezkoa da ezagutza medikoak eta ingeniarietakoak batzea, esperimintazio eta ikerketa-lan desberdinetatik lor daitezkeen aurrerapen teknologiko guztiak irizpide medikoetan oinarritu behar baitira. Kontuan hartuta anatomia dela medikuntzaren oinarria [7], tesi honetan kapitulu hau ezinbestekoa da giza gorputzaren egitura zein den ulertzeko.

Giza gorputzaren anatomia, gorputzaren egitura aztertzen duen zientzia bezala definitzen da eta zientzia biologiko zein medikoen hasiera izan zela uste da. Antzinaroan hitz hau erabiltzen hasi ziren: antzinako greziarrak hasi ziren gorpuak disezionatzen. Horregatik agertu zen anatomia hitza, moztu, banatu esanahia duena.

Historian zehar, zibilizazioek aurrerapenak egin dituzte giza gorputza, haren ehunak, organoak eta zelulak aztertzeari dagokionez. Gaur egun, termino horren dibisioak edo azpi-diziplinak daude, hala nola: Anatomia Sistemikoa edo Deskriptiboa (gorputzaren azterketa sistemen eta aparatuen arabera), Anatomia Erregional edo Topografikoa (gorputzaren azterketa gorputz-zonaldearen arabera), Anatomia Mikroskopikoa edo Histologikoa (ehunen eta organoen azterketa mikroskopioa erabiliz), Anatomia Funtzionala (giza gorputza osatzen duten egituren helburuaren azterketa), Neuroanatomia (nerbio-sistemaren anatomia azterketa) eta Anatomia Patologikoa (organo eta sistemen gaixotasun edo patologien azterketa).

Tesi hau garatzeko ezinbestekoa da giza gorputzaren anatomia eta fisiologia ezagutzea. Anatomia giza gorputzaren egituraren osagaien azterketan zentratzen den bitartean, aurreko paragrafoetan azaldu den bezala, fisiologia organismo bizidunen funtzioak aztertzen dituen zientzia da, bai osasunaren egoeran, bai gaixotasunarenean.

## 2. KAPITULUA - GIZA GORPUTZAREN ANATOMIA ETA FISILOGIA

---

XVIII. mendean sortu zen *fisiologia* edo *anatomia biziduna* terminoa, esperimentazioan oinarrituta, giza gorputzak nola funtzionatzen duen ulertzen laguntzeko. Teknologia aurrera egin ahala, esperimentazio- eta behaketa-teknika berriak agertzen dira, eta XX. mendean aurkikuntza fisiologikoak gero eta erritmo handiagoan gertatzen dira. Aurrerapen teknologikoei esker, fisiologia hainbat adarretan banatzen da: neurofisiologia (nerbio-sistema zentralaren eta periferikoaren funtzioen miaketa), elektrofisiologia (bihotzaren jarduera elektrikoaren miaketa), fisiologia zelularra (zelula batean gertatzen diren jardueren azterketa biologikoa, bizirik mantentzeko) eta medikuntzako espezialitateei dagozkien beste batzuk: kardiofisiologia, endokrinologia, arnas fisiologia, etab.

Fisiologia medikuntza modernoaren funtsezko zutabea da; izan ere, talde medikoentzat ezinbestekoa da organismoaren funtzioak ezagutzeta, bai baldintza normaletan, bai patologikoetan. Azken hauek funtzio normalen alterazioak dira, detektatu eta ulertu ahal izateko alde aurretik giza gorputzaren fisiologia zein den jakin behar da.

Tesi honetan aurkezten den lana giza gorputzean gertatzen diren fenomenoak automatikoki ikasiz hautematean oinarritzen da. Hori horrela izanik, ezinbestekoa da anatomiari eta fisiologiari buruzko oinarritzko ezagutzak izatea tesi-memoria honetan deskribatuko den lana ulertzeko. Horregatik, kapitulu honetako 2.2. Atalak tesi honetan egindako ikerketa-lanarekin lotutako bizi-organoen egitura eta funtzioak deskribatuko ditu. Jarraian, 2.3. Atala zehatz-mehatz sartuko da disreflexia autonoma izeneko patologiarenean azalpenean, lan honetan aurkeztutako lehen ekarpenaren oinarria baita. Azkenik, 2.4. atalak egoera emozionalen eremua aztertuko du, tesi honen bigarren ekarpena babesten duena.

### 2.2. Giza gorputzaren sistema organikoak eta funtzioak

Funtzio komuna betetzen duten eta giza gorputzaren antolamendu-maila garrantzitsua ordezkatzeko duten organoen multzoari sistema organikoak esaten zaio. Giza gorputza ezaugarri morfofuntzional komunak dituzten lau sistema organikotan banatzen da: somatikoak, erraietakoak, zirkulaziokoak eta nerbiozkoak. Sistema organiko horietako bakoitza, aldi berean, aparatua ezberdinez osatuta dago, betetzen duten funtzioaren arabera. Ondoren, sistema horietako bakoitza osatzen duten organoak zerrendatzen dira.

Giza gorputzaren hormak osatzen dituzten organoak eta egiturak sistema somatikoen parte dira. Sistema horien barruan, sistema tegumentarioa (azala eta eranskinak) eta sistema osteomioartikularra edo lokomozio-aparatua (hezurrak, artikulazioak eta muskulu eskeletikoak) daude.

Errai-sistemen parte diren organo eta egiturei erraiak esaten zaie, giza gorputzaren barrunbe handietan daude eta organismoaren funtzio begetatiboe-tan esku hartzen dute. Erraietako sistemen barruan daude digestio-aparatua (elikadura-kanala eta guruin erantsiak), arnas aparatua (arnas-hodiak eta birrikak), gernu-aparatua (gernu-hodiak eta giltzurrunak), aparatua genitala (guruin

## 2.2. GIZA GORPUTZAREN SISTEMA ORGANIKOAK ETA FUNTZIOAK

---

sexualak edo gonadunak, ubide genitalak, guruin erantsiak eta kanpoko edo perinealeko zatia) eta aparatu endokrinoa (guruin independenteak eta elkartuak).

Gorputzeko likidoak (odola eta linfa) garraiatzen dituzten organoek eta egiturek osatzen dute zirkulazio-sistema. Talde horren barruan daude sistema kardiobaskularra (bihotza, odol- eta linfatiko-hodiak) eta immunitate-sistema edo organo hematopoietikoa (mieloideak eta linfoideak).

Azkenik, nerbio-sistema dago. Sistema hori organo eta egiturek osatzen dute, eta organo eta egitura horiek organismo osoan banatzen dira, nerbio-erregulazioko funtzio integratzailea betetzeko. Nerbio-sistema bi taldetan banatzen da: erdialdea (bizkarrezur-muina eta entzefaloa) eta periferikoa (nerbioak, gongoilak eta nerbio-amaierak).

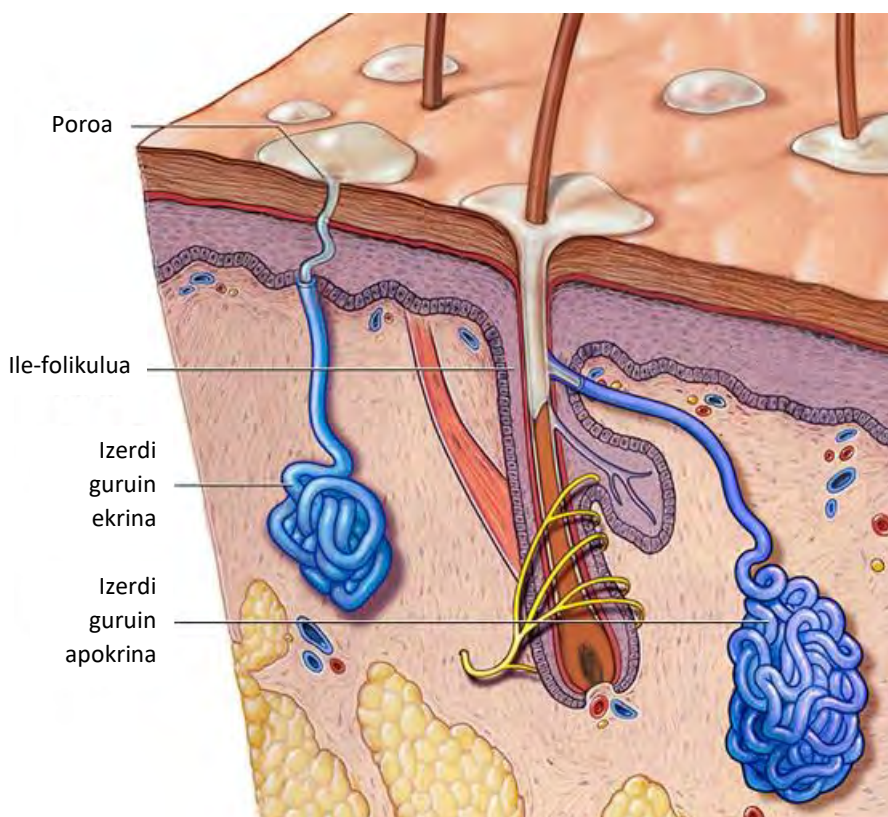
Giza gorputzaren sistema organikoen sailkapena ikusi ondoren, tesi honetan aurkeztutako lanak aurretik zerrendatutako lau lan bakarrik izango ditu ardatz: tegumentario aparatua, germu-aparatua, sistema kardiobaskularra eta nerbio-sistema.

### 2.2.1. Tegumentario aparatua

Sistema tegumentarioaren funtzioak dira, batetik, kaltearen aurkako babesa eta, bestetik, inguruko ingurunea hautemateko gaitasuna. Sistema hau honako hauek osatzen dute: larruazalak, larruazalaren eranskinak (ileak, azazkalak, izerdi guruinak, seba guruinak), larruazalpeko ehunak, larruazal-muineko loturak eta bularrek. Hau da, gorputz osoa inguratzen duen gorputz-sistema da.

III. Zatian azaldutako ekarpenetan deskribatzen den bezala, tesi honen oinarrian dagoen lanaren helburua da Ikaskuntza Automatikoko teknikak aplikatuz gorputzean gertatzen diren hainbat fenomeno detektatzea. Horretarako, hainbat seinale fisiologiko bildu behar dira, larruazalaren gainean kokatutako elektrodoak erabilia. Aurreko paragrafoan zerrendatutako sistema tegumentarioaren osagai guztien artean, lan hau izerdi-guruinetan baino ez da zentratzen, horiek ematen baitute tesi honetan aurrerago bilatuko diren fenomenoaren zati bat hautemateko behar den informazioa.

[8]-tik ateratako 2.1. Irudian erakusten diren izerdi-guruinak larruazalean kokatutako tutu-egitura txikiak dira, eta organismoaren guruin sekretuen parte dira. Beraz, bere funtzioa substantziak, kasu honetan izerdia, gainazal epiteliara eroatea da, hainbat hodiren bidez. Bi izerdi guruin mota daude: ekrinak eta apokrinak. Lehenengoak, ugariak ia gorputz osoa estaltzen dutenak, larruazalaren gainazalean irekitzen dira zuzenean izerdiaren poroan zehar, eta gorputzaren tenperatura erregulatzeaz arduratzen dira, izerdi usaingabea, koloregabea eta urtsua jariatuz. Normalean, izerdi horrek eragiten du hiperizerdia. Bigarrenak larruazalaren gainalderaino hedatzen diren ile-folikuletan amaitzen dira, eta horregatik daude, batez ere, ile-folikulu asko dituzten eremuetan, hala nola buruko ile-larru, besape eta eremu genitalean. Guruin horiek esentziak askatzen dituzte, usaindun izerdia sortuz.

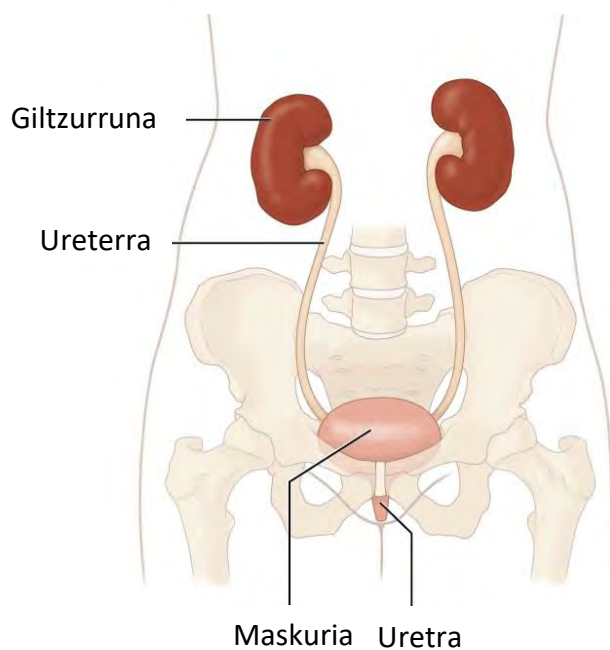


**2.1. Irudia:** Izerdi-guruinak.

Tesi honi dagokionez, izerdi guruin ekrinak dira gehien interesatzen direnak, ugarienak direnez eta gorputzeko atal askotan daudenez, neurketak egiteko elektrodoak jartzea errazten baitute. 2.1. Irudian ikus daitekeen bezala, guruin horiek egitura tubular luzeak dira, dermisen oso biribilkaturik dagoen zati bat eta guruinetik abiatzen den eta izerdia gorputzaren kanpoaldera eramaten duen hodi estu bat dituztenak, larruaren gainazaleko poro batetik.

### 2.2.2. Gernu-sistema

Gernu-aparatua osatzen duten organoen funtzio nagusiak dira gernua ekoiztea, biltegitratzea eta kanporatzea, organismotik hondakin nitrogenatu likidoak kentzeko, hala nola urea eta azido urikoa, baita beste gai toxiko batzuk ere. 2.2. Irudiak, [9]-tik ateratakoak, erakusten duenez, aparatua hau bi giltzurrunek, bi ureterrek, maskuriak eta uretrak osatzen dute [10].



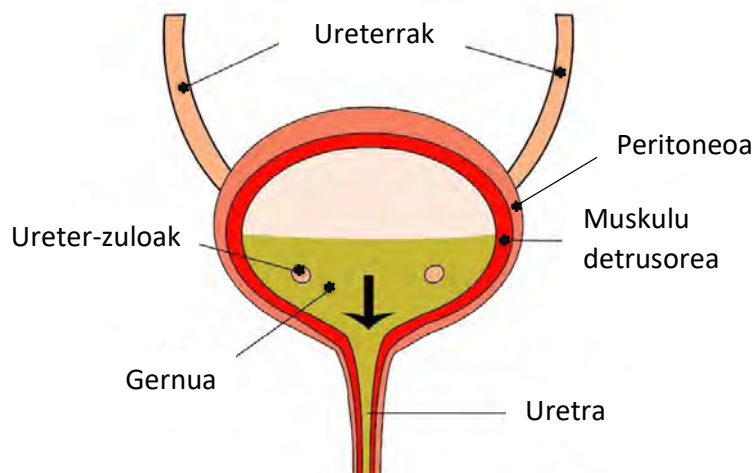
### 2.2. Irudia: Gertu-aparatua.

Giltzurrunak saihetsen azpian dauden bi organo dira, azken bi torax-ornoen parean, eta oinarrizko bi funtzio dituzte. Lehenengoan, odolean dauden hondakin likidoak (urea) iragazten dira nefronak izeneko iragazketa-unitateen bidez, eta gertu-forman desagerrarazten dira. Bigarrena, globulu gorriak sortzeko eritropoyetina izeneko hormona ekoiztea da.

Giltzurrunetatik datorren gertuak ureter izeneko bi hodi estuetan zehar zirkulatzen du. Hodi horiek 10 segundoan behin uzkuratzen eta erlaxatzen diren muskuluak dira, eta gertua maskurira iristea ahalbidetzen dute.

Jarraian maskuria dago. Organo hori zehatzago azaltzen da, tesi honetarako egindako lanaren zati bat hartan oinarritzen baita. Maskuria gorputzaren beheko sabelean dagoen organo huts bat da. 200 ml inguruko edukiera du, eta forma esferikoa du beteta dagoenean, eta tetraedrokoa hutsik dagoenean. Maskuriak bi funtzio nagusi ditu. Alde batetik, ureteretatik zehar iristen den gertua metatzeko funtzioa du, organo horiek osatzen dituzten hormak erlaxatuz eta dilatatuz. Beste aldetik, maskuriak horma horiek hartu eta lautzen ditu, uretran zehar gertua kanporatuz husteko.

2.3. Irudian ikus daitekeenez, [11]-tik lortua, maskuria egitura batzuek osatzen dute. Egitura horiei esker, organoa handitu egiten da gertua biltegitatzeko, eta, bolumen jakin batera iritsi denean, hustu egiten da, gertua gorputzaren kanpoaldera irits dadin mikzio-fluxu egoki baten bidez.



2.3. Irudia: Maskuria.

Gernua maskurian sartzen da organo horren erdialdean dauden ureter-zuloetatik. Sartzeko bide horiek maskuriaren ezkerrean eta eskuinaldean dauden bi irekidurek osatzen dituzte.

Maskuriaren gainazalari peritoneoa esaten zaio. Mintz horren funtzioa organo horren barne-zatiak babestea da, eta tolesturek osatzen dute. Tolesturek malgutasun handia ematen diote maskuriari, jasaten dituen tamaina-aldaketekiko erresistentea izan dadin.

Peritoneoaren azpian muskulu-zuntz batzuk daude, maskuri osoa inguratzen duen muskulu detrusorea osatzen dutenak. Betetze-bolumen maximoa lortzen denean edo, bere borondatez, mikzionatu nahi denean, garunak seinaleak bidaltzen dizkio muskulu detrusorearekin konektatuta dauden nerbio-talde bati, eta muskulu hori osatzen duten zuntzak uzurtu egiten dira, gernua uretran zehar kanpora ateraraziz eta maskuriaren tamaina txikituz.

Azkenean uretra dago. Maskuritik datorren gernua gorputzetik kanporatzeko hodia da, garunak esfinterreko muskuluei lasaitzeko bidaltzen dizkien seinaleei esker.

### 2.2.3. Sistema kardiobaskularra

Sistema kardiobaskularrak, odoleko zirkulazio-sistema ere deitua, eta sistema linfatikoak osatzen dute zirkulazio-sistema, odola eta linfa gorputzetik zirkulatzeari ahalbidetzen duten organo- eta egitura-multzo batez osatua. Helburua da mantenugaiak eta beste substantzia batzuk garraiatzea, hondakin metabolikoak biltzea, organismoa gaixotasun infektzioetatik defendatzea eta organismoaren gorputzeko eta zeluletako tenperatura erregulatzen laguntzea.

## 2.2. GIZA GORPUTZAREN SISTEMA ORGANIKOAK ETA FUNTZIOAK

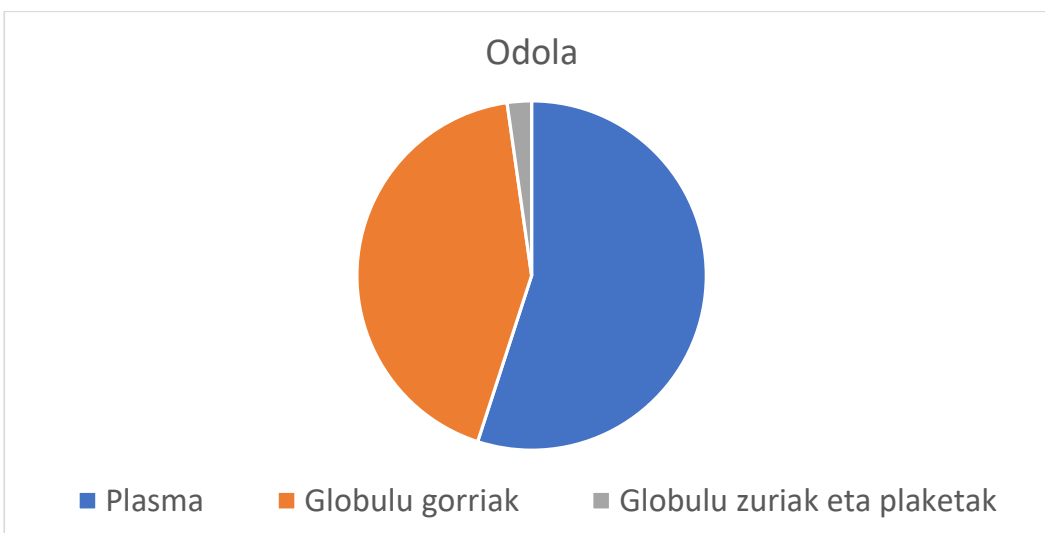
Sistema linfatikoa linfa (proteinak, gatzak, glukosa eta beste substantzia batzuk dituen likido garden eta urtsua) gorputz osoan garraiatzen duten hodi linfatikoz osatutako sare batek eratzen du. Bere funtzio nagusiak dira, bate-tik, gorputz-likidoak orekan mantentzea eta, bestetik, gorputza infekzioetatik babestea [12].

Sistema kardiobaskularra odolak, odol-hodiek eta bihotzak osatzen dute. Bere funtzio nagusia organismo osoan zehar odol-zirkulazioa ahalbidetzea da, horrela oxigenoa, hormonak, mantengutza eta beste substantzia batzuk gorputze-ko zeluletara, ehunetara eta organoetara banatzea lortuz.

### Odola

Odola ehun konektibo bat da, likidoa eta zelulak nahasten dituen, oinarri koloidal urtsua eta osaera konplexu eta berriztagarria duena, hezur-muinean egiten dena eta zirkulazio-sistemako odol-hodietan zirkulatzen duena.

Odola zati solido batek osatzen du (%45), osotasunaren %95ean globulu gorriak (eritrozitoak edo hematiak) eta gainerako %5ean globulu zuriek (leukozi-toak) eta plaketek (tronboitoak) eratuak. Zati likidoa, odol-plasma deritzona, odolaren bolumen osoaren %55 da, %90 ura da eta gainerako %10 proteinak eta gatzak dira. 2.4. Irudiak grafiko zirkular bat erakusten du, eta horri esker ikusten da odolaren osagaien ehunekoa.



2.4. Irudia: Odol-konposizioa.

Odolaren funtzioak ugariak dira, baina garrantzitsuenak honako hauek dira: lehen globulu gorriek esker, mantengutza, oxigenoa ( $O_2$ ) eta hormonak gorputzeko atal guztietara garraiatzea da. Beste zeregin bat da antigorputzak bidaltzea leukozitoen bidez, organismoan agertzen diren infekzioei aurre egiteko.

## 2. KAPITULUA - GIZA GORPUTZAREN ANATOMIA ETA FISILOGIA

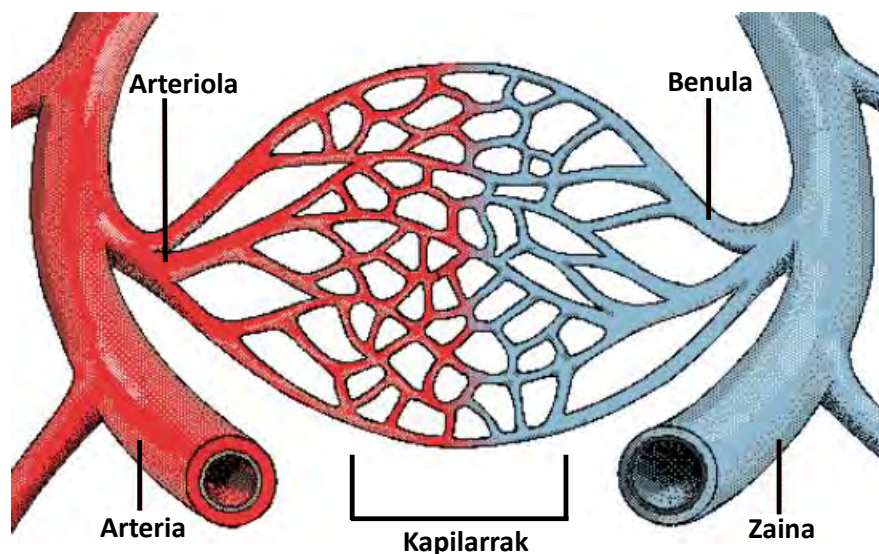
Globulu gorriak berriro ere karbono dioxidoa ( $CO_2$ ) eta zelula desberdinetatik datozen beste hondakin batzuk garraiatzeko hirugarren lanean protagonista dira. Azkenik, bizi-funtzio desberdinak betetzen ditu, hala nola termorregulazioa, gorputza tenperatura egokian mantenduz eta koagulazioa, plaketen bidez, odolaren fluxua bera eta organismoaren ehunen orbaintzea erraztuz.

Sistema kardiobaskularraren lehen osagai horren deskribapena amaitzeko, aipatu behar da batezbesteko odol kopurua gorputz-pisu osoaren %7 dela (4 eta 5 litro artean) eta bere kolore gorrixka globulu gorrien hemoglobina pigmentuaren ondorio dela.

### Odol-hodiak

Odol-hodiak hodi hutsen formako egiturak dira, odola gorputz osoan zehar garraiatzen dutenak.

2.5. Irudian ikus daitekeenez ([13]-tik aterata), odol-hodiak beste bost egituraz osatuta badaude ere (arteriak, arteriolak, zainak, benulak eta kapilarrak), hiru talderen sailkapen anatomikoa egin daiteke, egitura bakoitzaren ezaugarrietan zentratuta. Lehenengoa arteriek eta arteriolek osatzen dute: odola bihotzetik urruntzen den hodiak dira. Bigarrenak benulei eta zainei egiten die erreferentzia, odola bihotzera isurtzen den hodiak barnebilduz. Horrelako hodiekin balbulak dituzte, baina beste bi kasuetan ez da horrelakorik gertatzen. Azkenik, hirugarren multzoan, kapilarrak daude. Hormen argaltasunari esker, zelulaz kanpoko ingurunearekin elkartrukea ahalbidetzen duten hodiak dira.



2.5. Irudia: Odol-hodien sailkapen anatomikoa.



## 2.2. GIZA GORPUTZAREN SISTEMA ORGANIKOAK ETA FUNTZIOAK

---

Arteriak odol-hodiak dira, eta odolak bihotzetik gorputzeko organo guztietara zirkulatzen du, odolean dauden oxigenoa eta mantenugaiak garraiatuz, biriketako arteriak izan ezik, horiek karbono dioxidoa duen odola garraiatzen baitute. Hormak lodiak, gogorak eta elastikoak dira presio handiak jasan ahal izateko. Paretetako muskuluak lauak dira eta nerbio-sistema autonomoaren mende daude, uzkurto eta luzatu egiten dira bihotzeko odol oxigenatuak gorputzeko organo bakoitzera egiten duen presioa erregulatzeko. Sistole bentrikularrarekin, bihotza uzkuratzen den unea, honen muskulu-ehunaren uzkurduraren ondorioz, odola bihotzetik ateratzen da eta arteria bete egiten da. Odolak arteriatik bihotzera atzera egin ez dezan, behin sistolearen zikloa egin ondoren, balbula sigmoideak itxi egiten dira.

Giza gorputzaren arteria handiena aorta da, helduetan 25 mm-ko zabalera izan dezakeena.

Bihotzetik urrundu ahala, arteriak arteriola deritzen beste hodi meheago eta ez hain elastiko batzuetan adarkatzen dira, eta horien funtzioa kapilarrei odola askatzeko erabiltzen diren hodiak kontrolatzea da.

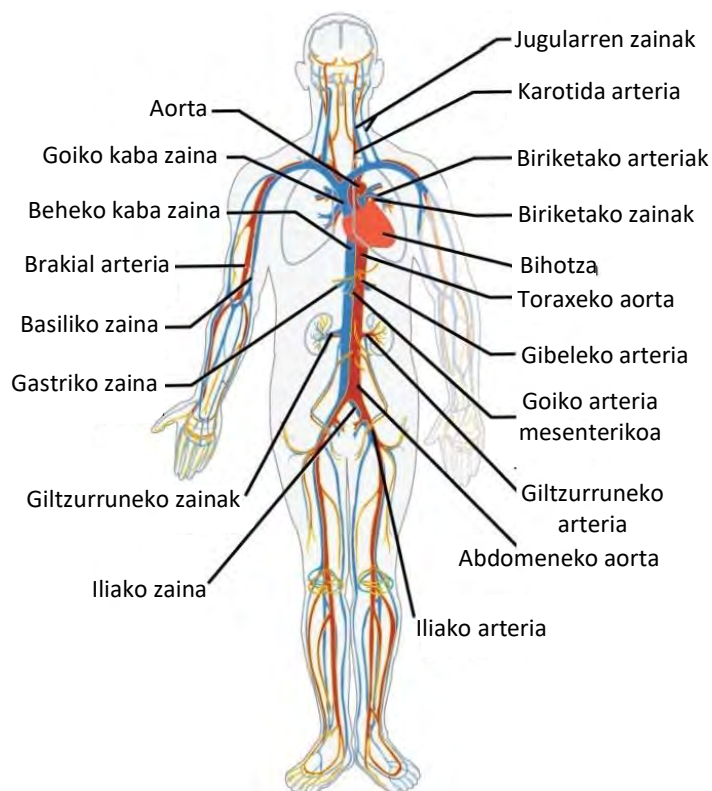
Sailkapen anatomikoaren bigarren multzoan zainak eta benulak ageri dira. Odol-hodien barruan, odol desoxigenatua organoetatik eta odol-kapilarretatik bihotzeraino eramateko funtzioa duten zainak daude, bi salbuespenekin: lehenengoa, bihotzera iritsi aurretik gibelatik eta biriketatik igarotzen den zain porta da, karbono dioxidoa eta zelulen beste hondakin metaboliko batzuk kentzeko. Bigarren irregulartasuna zainetako odolaren ordez odol arteriala garraiatzen duten biriketako zainek ematen dute, zainek garraiatzen duten odolari esaten zaion bezala. Hodi huts formako egiturak dira, eta ez dute xafra elastikorik, arterien kasuan gertatzen den bezala, eta odola igarotzeko barrunbea arteriena baino handiagoa da. Giza gorputzean arteriak baino zain gehiago daude eta odol-bolumen osoaren %70 inguru dute.

Giza organismoaren zainik handienak goiko kaba zaina eta beheko kaba zaina dira, heldu batean 35 mm-ko zabalera izan dezaketenak.

Bigarren multzo horren barruan, benulak daude, kalibre oso txikiko odol-hodiak, eta, gero, batu ahala, zainak eratzen dituzte. Hodi horien funtzioa kapilarretako odola biltzea eta zainetara eramatea da, ondoren zainek bihotzeraino eraman dezaten. Benulak kapilar ondoko mailan gasak, mantenugaiak eta hondakinak trukatzear arduratzen dira.

2.6. Irudian, [14]-tik ateratakoan, organismoan dauden zain eta arteria nagusiak ikus daitezke. Horiek bereizteko, literaturan arteriak gorriak eta zainak urdin kolorekoak irudikatzen dira. Zainei esleitutako kolorearen arrazoia da odol-hodien gainazala apur bat urdinxka dela, eta arteriak sakonago eta zainak azalago igarotzen direnez, normala da azkenekoetan tonu urdina detektatzea.

## 2. KAPITULUA - GIZA GORPUTZAREN ANATOMIA ETA FISILOGIA



### 2.6. Irudia: Giza gorputzaren arteria eta zain nagusiak.

Amaitzeko, kapilarrek sailkapen anatomiko honen hirugarren taldea osatzen dute. Pareta oso finak dituzten tutu mikroskopikoak dira. Arteriolak eta benu-lak lotzeko funtzioa dute. Horrela, ehunetan oxigenoa eta mantenugaiak trukatu ahal izango dira, eta karbono dioxidoa eta hondakin metabolikoak ehunetatik odol-zirkulaziora eramango dira, ondoren desagerrarazteko. Kapilarretako hormak odol-hodiek osatzen dituzten horma finenak dira, odolaren eta zelulen arteko substantzia-trukea errazteko.

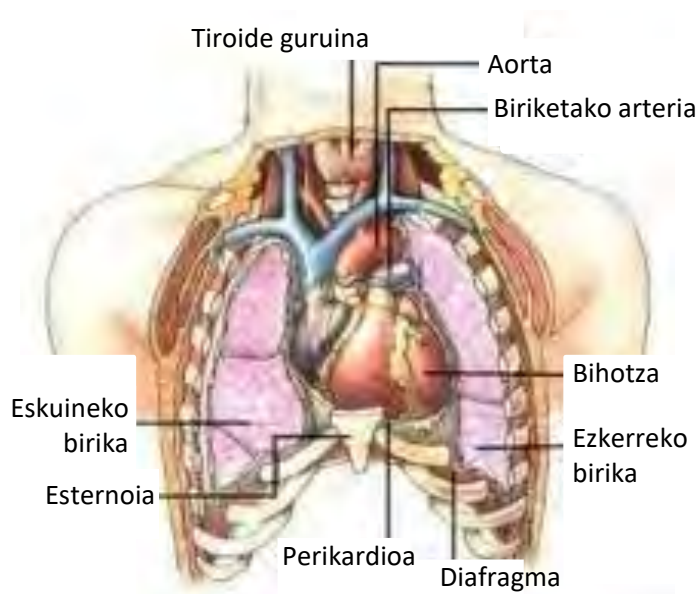
### Bihotza

Bihotza muskulu-ehunez osatutako organo bat da, eta bere funtzio nagusia odol-hodien barruan odola ponpatzea da, gorputz osora garraiatzeko. Odola organismo osoan zehar garraiatzeko prozesuari zirkulazio esaten zaio.

Bihotzak, [15]-tik 2.7. Irudian ikusten den bezala, ukabil baten tamaina du gutxi gorabehera, eta toraxaren erdialdean dago, bi biriken artean, eta bula-

## 2.2. GIZA GORPUTZAREN SISTEMA ORGANIKOAK ETA FUNTZIOAK

rrezurraren ezker aldean. Perikardio izeneko mintz zuntzdun batez inguratuta dago eta diafragmaren gainean dago. Diafragma horrek barrunbe torazikoa eta abdominala bereizten ditu.



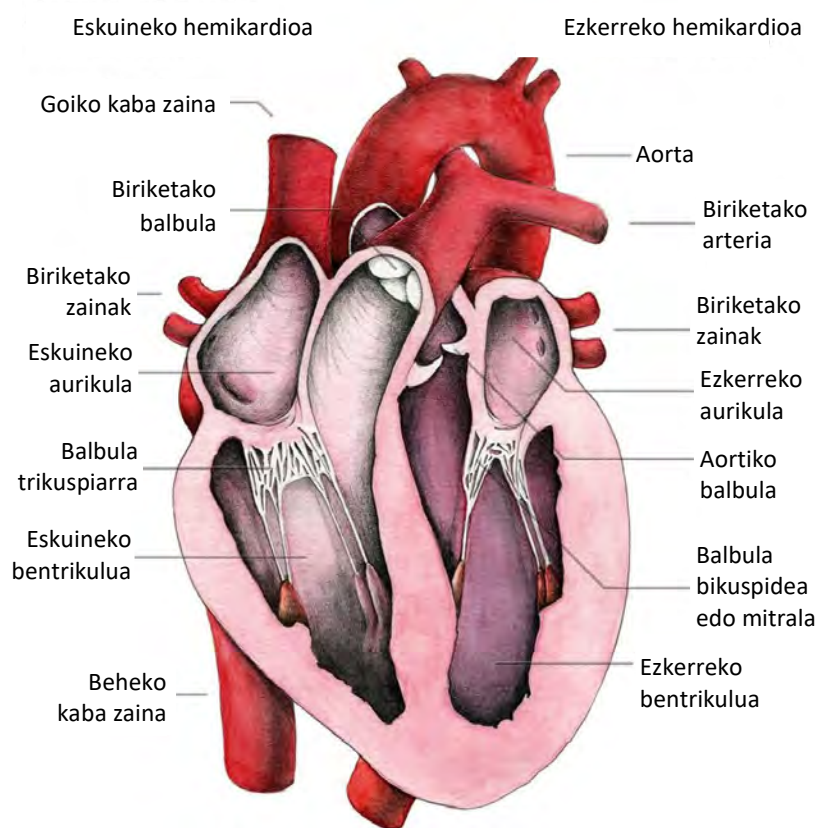
### 2.7. Irudia: Bihotzaren kokapena giza gorputzean.

Organo horren barne-egiturari dagokionez, nabarmentzekoa da lau ganbera edo barrunbe dituela [16]-tik ateratako 2.8. Irudiak erakusten duen bezala. Aurikulak bihotzaren goiko aldean osatzen duten bi barrunbeak dira, bata eskuinaldean eta bestea ezkerrean. Gainerako bi barrunbeak organo horren behealdean daude, eta bentrikuluak esaten zaie. Horietako bat eskuineko aldean dago, eta bestea ezkerrekoan.

Bihotzaren egiturari dagokionez, ikuspegi funtzionaltik, organo hori bi zatitan banatzen da: hemikardioa edo eskuineko bihotza eta ezkerrekoa. Lehena eskuineko aurikulak eta eskuineko bentrikuluak osatzen dute; bigarrena, berriz, ezkerreko aurikulak eta ezkerreko bentrikuluak. Bi zatiak septo izeneko ehun batek banatzen ditu.

Odola norabide egokian joan dadin eta bere norabidea alda ez dadin, bihotzak lau bihotz-balbula ditu, aurreko paragrafoetan aipatutako barrunbeen artean kokatuak: trikuspiarra, biriketako, mitrala eta aortikoa. Balbula horiek hegalak dituzte, eta ireki eta itxi egiten dira, odola norabide egokian dabilela ziurtatzeko, atzera egitea eragotziz.

## 2. KAPITULUA - GIZA GORPUTZAREN ANATOMIA ETA FISIOLOGIA



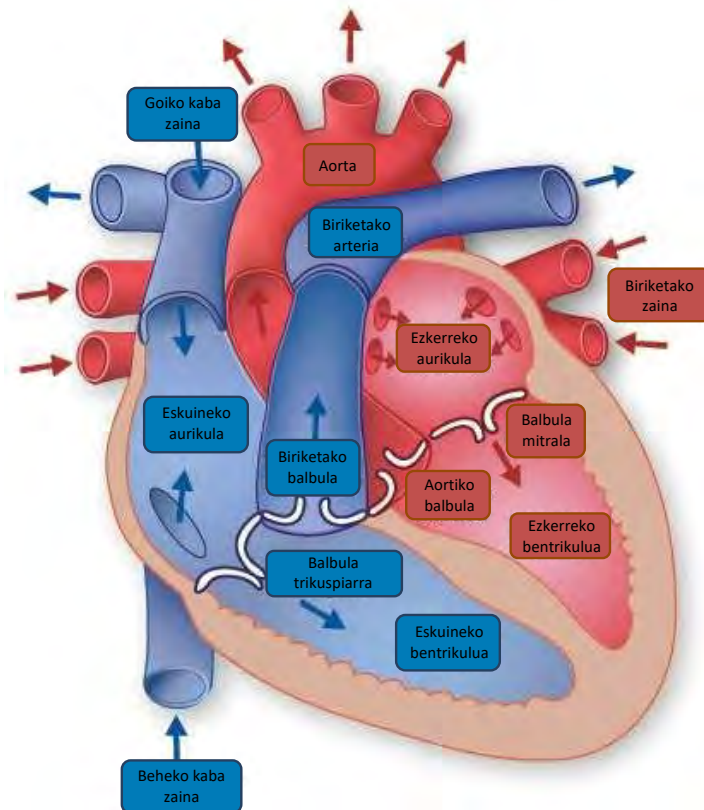
2.8. Irudia: Bihotzaren barne-egiturak.

Jarraian, [17]-tik lortutako 2.9. Irudian grafikoki ikus daitekeenez, bihotzaren funtzionatzeko modua deskribatuko da.

Lehenik, odol desoxigenatua (odol urdina) eskuineko aurikulara iristen da zainetatik, eta eskuineko bentrikulura igarotzen da, balbula trikuspiarra zeharkatuz. Une horretan eskuineko bentrikulua uzkuertzen da eta, biriketako balbularen bidez, odola biriketako arteriara bidaltzen da. Arteria hori bi arteriatan banatzen da: bata eskuineko birikarako eta bestea ezkerrekorako. Behin odola biriketan dagoenean, oxigenatu egiten da eta, eskuineko eta ezkerreko birikazainetatik, odol oxigenatua (odol gorria) ezkerreko aurikulara itzultzen da. Balbula bikuspidearen edo mitralaren bidez, odola ezkerreko aurikulatik ezkerreko bentrikulura igarotzen da, eta, azkenik, balbula aortikoaren bidez, odola ezkerreko bentrikulutik aortara igarotzen da. Aorta hori hodi askotan adarkatzen da, eta odola gorputzeko organo eta ehun guztietara eramaten dute, biriketara izan ezik. Adar horietako lehenak arteria koronarioak dira. Arteria horien funtzioa odol oxigenatua berriro bihotzera eramatea da, bihotzak taupaka jarrai

## 2.2. GIZA GORPUTZAREN SISTEMA ORGANIKOAK ETA FUNTZIOAK

dezan behar diren oxigenoa eta mantenugaiak ateratzeko eta karbono dioxidoa eta beste hondakin metaboliko batzuk biltzeko. Prozesu hori bera egiten da gorputzeko gainerako organo eta ehunetan, eta odola oxigenorik gabe geratzen denean (odol urdina), bihotzaren eskuineko aurikulara itzultzen da zainetan barrena, paragrafo honetan zehaztutako urratsak modu ziklikoan errepikatzeko.



2.9. Irudia: Bihotzaren funtzionamendua.

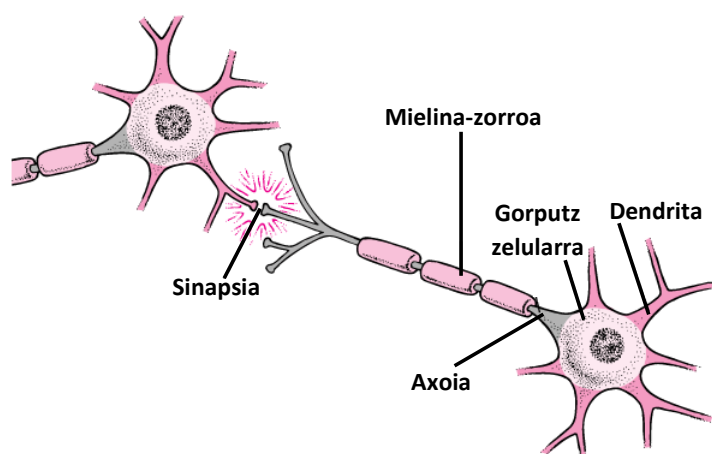
### 2.2.4. Nerbio-sistema

Giza gorputza osatzen duten sistemen artean, nerbio-sistema da garrantzitsuenetako eta konplexuenetako bat. Atal honetako hurrengo paragrafoetan xehetasun handiagoz azalduko den arren, sarrera gisa esan daiteke nerbio-sistema seinale elektrikoak gidatzen espezializatuta dauden zelulen multzo bat dela, organismoaren barrualdetik zein kanpoaldetik datorren informazioa jaso eta prozesatzeko, gorputzaren gainerako organo eta sistemen funtzionamendua erregulatzeke helburuarekin. Sistema honen funtzio nagusietako bi dira: funtzio sentoriala eta funtzio motorra. Lehenengoa organo hartzaileen bidez kanpoko zein ba-

## 2. KAPITULUA - GIZA GORPUTZAREN ANATOMIA ETA FISIOLOGIA

rruko estimuluak hautematean oinarritzen da (pertzepzioa, zentzumenak, pentsamenduak eta emozioak, ikaskuntza eta memoria, loa, etab.). Bigarrena muskuluen estimulazioan oinarritzen da (mugimendua, oreka, koordinazioa, etab.).

Nerbio-sistema osatzen duten zelula espezializatuei dagokienez, bi taldetan sailkatzen dira: neuronak edo nerbio-zelulak eta glia-zelulak. Neuronak nerbio-sistemako zelula nagusiak dira, eta nerbio-sistema osoan zehar informazioa prozesatzeaz eta transmititzeaz arduratzen dira. 2.10. Irudiak, [18]-tik lortuak, zelula horiek osatzen dituzten lau zati nagusiak erakusten ditu: dendritak, gorputz zelular bat, axoia eta sinapsia edo botoi terminalak.



**2.10. Irudia:** Neurona edo nerbio-zelula baten zatiak.

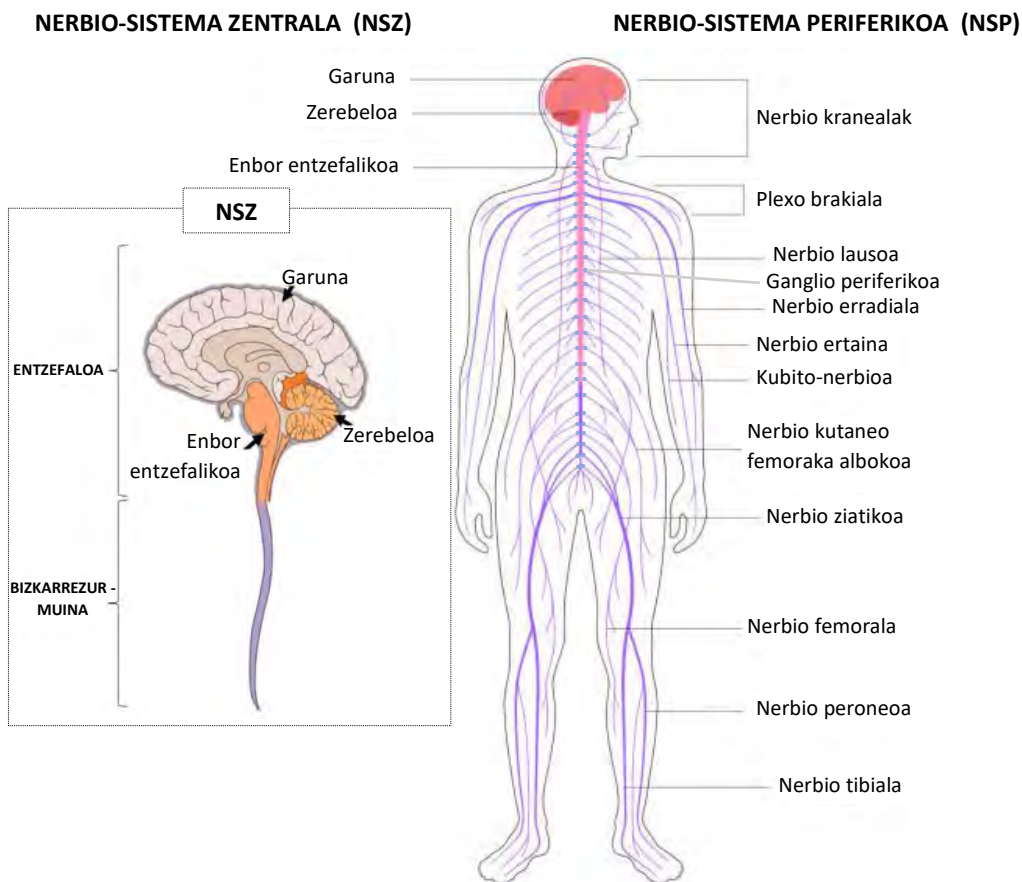
Seinale elektrikoak dendriten bidez jasotzen dira, zelularen bizi-prozesuak mantentzeaz arduratzen den gorputz zelularretik isurtzen dira, eta axoitik jarraitzen dute sinapsiara iritsi arte, beste neurona baten dendritekiko komunikazio-puntua baita. Axoia mielina izeneko substantzia batez estalita dago, babesteko eta seinale elektrikoaren transmisio-abiadura handitzeko. Giza gorputzeko gainerako zelulek ez bezala, luzera handiko luzapenak dituzte eta birsortzeko gaitasun txikia dute.

Nerbio-sistemaren antolamendua bi modutan egin daiteke: ikuspegi anatomiko baten arabera edo ikuspegi funtzional baten arabera.

### Nerbio-sistemaren antolaketa anatomikoa

Nerbio-sistema, anatomiaren ikuspegitik, bi taldetan banatzen da, 2.11. Irudiak, [19, 20]-etatik lortuak, erakusten duen moduan: nerbio-sistema zentrala (NSZ) eta nerbio-sistema periferikoa (NSP).

## 2.2. GIZA GORPUTZAREN SISTEMA ORGANIKOAK ETA FUNTZIOAK



2.11. Irudia: NSZren eta NSPren osagaiak.

### *Nerbio-sistema zentrala (NSZ)*

Nerbio-sistema zentrala, alde batetik, entzefaloak osatzen du; entzefaloa garunak, zerebeloak eta enbor entzefalikoak edo garun-zurtoinak osatzen dute, eta, bestetik, bizkarrezur-muinak, entzefaloarekin konektatu eta bizkarrezuraren barrualdetik hedatzen denak. NSZ gorputzaren prozesu-unitate zentral gisa defini daiteke, bere funtzio nagusia organismoaren barrualdetik zein kanpotik datorren informazioa aztertzea baita, jasotako informazioarekin erantzun egokia sortu ahal izateko.

Jarraian, NSZren zati bakoitzak betetzen dituen funtzioak azalduko ditugu labur-labur. Garuna funtzio intelektualen erdigunetzat hartzen da, eta jasotako informazioa bost zentzumenen bidez prozesatzeaz arduratzen da, baita emo-

## 2. KAPITULUA - GIZA GORPUTZAREN ANATOMIA ETA FISILOGIA

---

zioak, ikaskuntza, memoria eta mugimendua kontrolatzeaz ere. Zerebeloa bizkarrezur muineko estimuluak garunera iristeaz arduratzen da, eta bere funtzioen artean daude bihotzaren taupada erregulatzea, oreka, arnas funtzioa eta muskuluen mugimenduak kontrolatzea, hala nola ibiltzea eta idaztea. Entzefaloaren hirugarren osagaia enbor entzefaliko da, eta haren xedea da oinarriko funtzio ez-boluntarioak kontrolatzea (loa, arnasketa, bihotz-kontrola) eta seinaleak transmititzea entzefaloaren eta bizkarrezur-muinaren artean.

NSZren bigarren osagaia bizkarrezur-muina da, entzefaloaren luzapen gisa defini daitekeena eta bizkarrezurraren barruan dagoena. Bere lana, alde batetik, gorputza eta entzefaloa komunikatzea da, bertatik sortzen diren nerbio espinalen bidez, eta, bestetik, erreflexu ekintza askoren kontrola daroma.

### *Nerbio-sistema periferikoa (NSP)*

Nerbio-sistema periferikoak bi osagai ditu: nerbioak eta gongoil periferikoak edo nerbio-gongoilak. Nerbioek edo nerbio-zuntz sortek garezurreko nerbioak (12 pare) zein bizkarrezurrekoak (31 pare) biltzen dituzte, hau da, nerbio-sistematik gorputz osora ateratzen diren 43 nerbio-bikoteak dira. Sorta gogorak eta erresistenteak dira, eta funtzio nagusia nerbio-sistema gorputzeko gainerako elementuekin komunikatzea da.

Nerbio-gongoilak NSZtik kanpo eta NSPren parte diren nerbioen ibilbidean dauden gongoil neuronek osatutako egiturak dira. Bere egitekoa NSZ organo sentorialekin konektatzea da.

Ikuspegi funtzionaletik, nerbio-sistema periferikoa nerbio-sistema somatikoan eta nerbio-sistema autonomoan (NSA) banatzen da. Hurrengo atalak NSP aurkezten du ikuspuntu horretatik.

### **Nerbio-sistemaren antolaketa funtzionala**

Aipatu bezala, ikuspuntu funtzionaletik, nerbio-sistema bi taldetan banatzen da: nerbio-sistema somatiko eta nerbio-sistema autonomoa.

### *Nerbio-sistema somatiko*

Nerbio-sistema somatiko neuronan sentsitiboek eta neuronan motorrek osatzen dute. Lehenengoen hartzaille sentorialetatik NSZra eramaten dute informazioa; bigarrenek, berriz, bulkada edo seinale elektrikoak muskulu eskeletikoetara eramaten dituzte, borondatezko mugimenduak egiteko. Beste era batera esanda, nerbio-sistema somatiko nerbio-sistema periferikoaren egitura guztiek osatzen dute, eta horien xedea informazio sentsitiboa bideratzea eta muskulu eskeletikoetara kontrol motorren informazioa eramatea da.

Bere funtzio nagusia hartzaille sentsitiboak NSZren organo sentorialetara konektatzea da, ondoren muskuluetara konektatzeko eta mugimendu boluntarioak eragiteko.



### *Nerbio-sistema autonomoa (NSA)*

Nerbio-sistema autonomoa, neurobegetazio-sistema edo nerbio-erraietako sistema ere deitua, neurona eta nerbio-bide multzo batek osatzen du, eta gorputzaren erraietako sistemak kontrolatzea du eginkizun. Hau da, nerbio-sistema periferikoaren zatia da, erraien nahi gabeko funtzioak kudeatzen dituena. Izenak berak adierazten duen bezala, sistema autonomoa da, eta ekintza ez-borondatezko ez edo inkontzienteez eta automatikoez arduratzen da.

NSAren eginkizun nagusia homeostasi-egoerari edo organismoaren egonkortasunari eustea da, eta erantzun egokiak sortzea, kanpoko eta barruko aldaketen aurrean egokitu ahal izateko.

NSAk kontrolatzen dituen nahigabeko funtzioak ugariak dira: bihotz-maiztasuna, zirkulazioa, arnasketa, izerditzea, digestioa, metabolismoa, gorputz-tenperatura, jariaketa glandularra, listu-jarioa, mikzioa, etab.

Nerbio-sistema honek gaizki funtzionatzearen ondorioz NSAren disfuntzioek hainbat sintoma eragiten dituzte, eta horiek disautonomia izenpean taldekatzen dira.

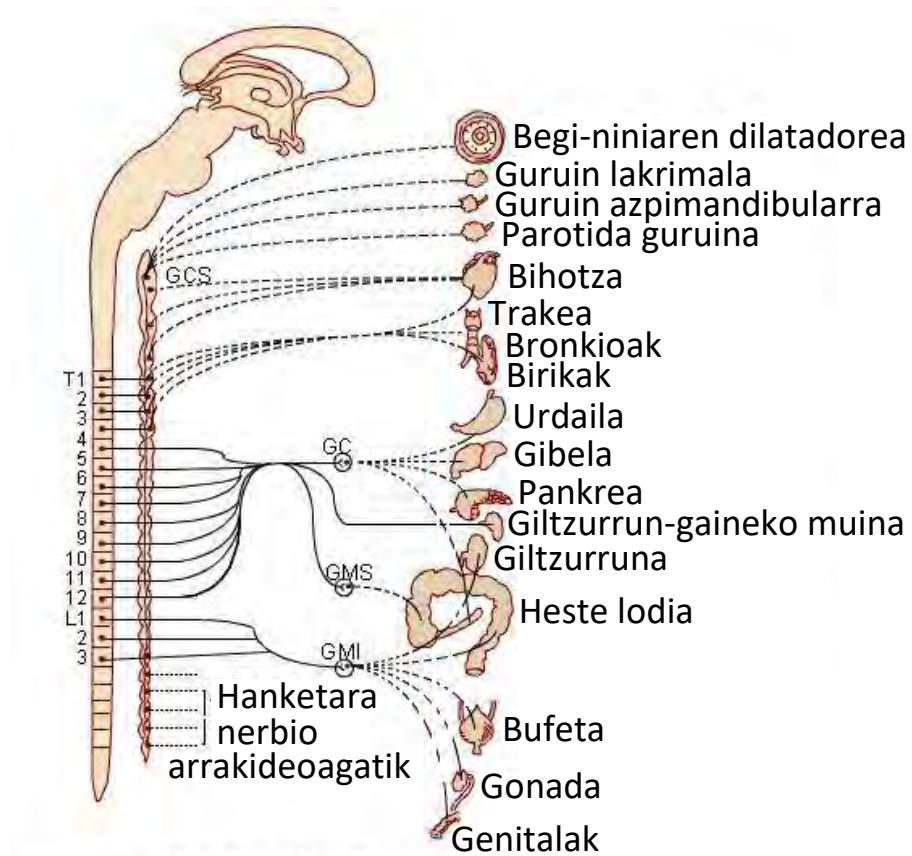
NSAren oinarrizko egitura eta funtzionamendua XX. mendearen hasieran definitu ziren, eta haren funtsezko bi banaketa aipatu ziren: sistema sinpatikoa eta parasinpatikoa [21, 22]. Gaur egun, NSA erraietako bide aferenteek, integrazio-zentroek (hipotalamoia eta garun-kortexa) eta erraietako bide eferente sinpatiko eta parasinpatikoez osatzen dutela baieztatzen da.

### **Nerbio-sistema sinpatikoa (NSS)**

Nerbio-sistema sinpatikoa alerta-egoeretan aktibatzen da, hau da, gorputza alerta- edo indar-egoerak eskatzen dituzten ekintzetarako prestatzeaz arduratzen da, hala nola arriskua, beldurra, haserrea, lotsa edo emozioa eragiten duten egoeretarako. Bere funtzioa organo batzuk kontrolatzea da, funtzioak, erreflexuak eta erraien erreakzioak azkar aktibatzea eskatzen duten egoeretan. NSS aktibatzeak epe laburrean larrialdiei aurre egin ahal izateko balio du.

Sistema sinpatikoaren bide eferenteak osatzen dituzten neurona sinpatikoak bizkarrezur-muinaren tarteko zutabeen daude, T1 eta L2 segmentuen artean [23], [24]-tik ateratako 2.12. Irudian erakusten den bezala.

Gorputza larrialdi-egoera batean prestatzeko, nerbio-sistema sinpatikoak hainbat bide konplexu aktibatzen ditu. Bide horietan, agerikoa da bihotz- eta arnasketaren erritmoa eta odol-presioa areagotzea, begi-ninien dilatazioa, izerditzea areagotzea eta odol-fluxua aldatzea, odola larruazaletik, urdailetik eta hesteetatik atera dadin, jarduera sinpatikoaren aurrean erantzun hori emateko behar diren garun, bihotz eta muskuluetara zuzentzeko. NSS aktibatzen denean egindako funtzio horietako batzuk 2.14. Irudian agertzen dira.



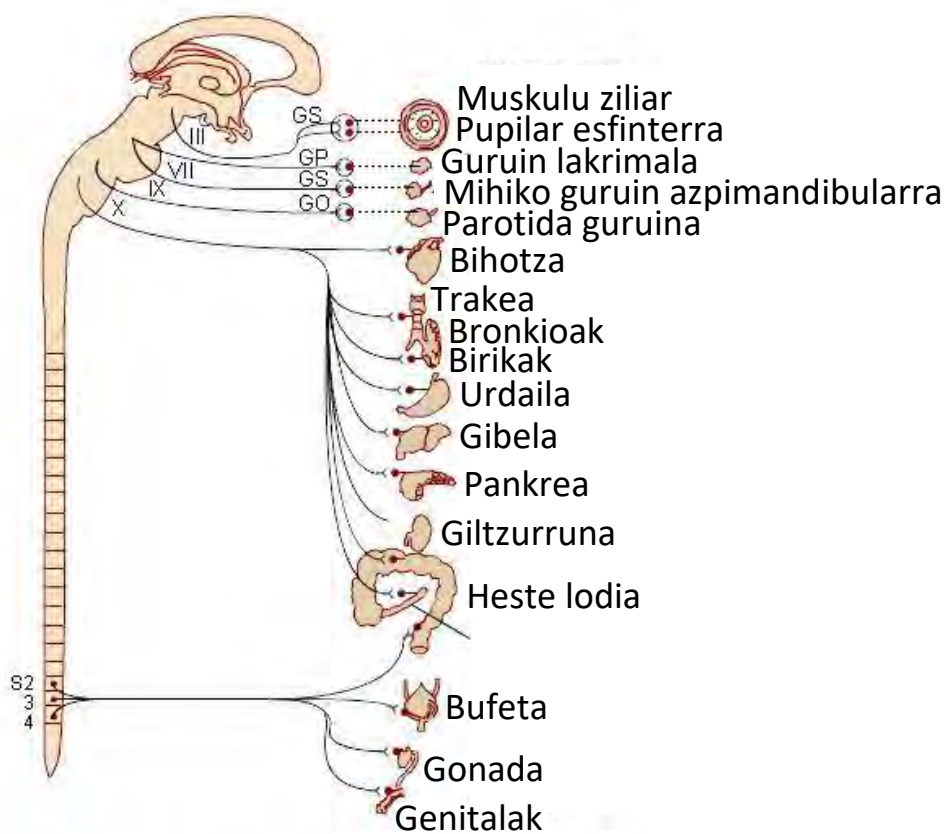
2.12. Irudia: Zuntz sinpatiko aferenteen eta eferenteen jatorria eta banaketa.

### Nerbio-sistema parasinpatikoa (NSPS)

Nerbio-sistema parasinpatikoaren funtzio nagusia energia biltegitzea edo aurrezte errazten duten jarduerak estimulatzea da. Energia kontserbatzera eta berreskuratzea eta epe luzerako ongizatea ziurtatzera bideratutako aldaketak eragiten ditu. Esan liteke nerbio-sistema parasinpatikoa sinpatikoaren kontrako delako, hau da, atsedendietan aktibo mantentzeaz arduratzen da, adibidez, digestioan.

NSPSren bide eragileak osatzen dituzten neurona parasinpatikoek soma enbor entzefalikoaren nukleoetan edo bizkarrezur-muin sakratuaren alboko zutabeetan dute, [24]-ko 2.13. Irudian ikus daitekeen bezala.

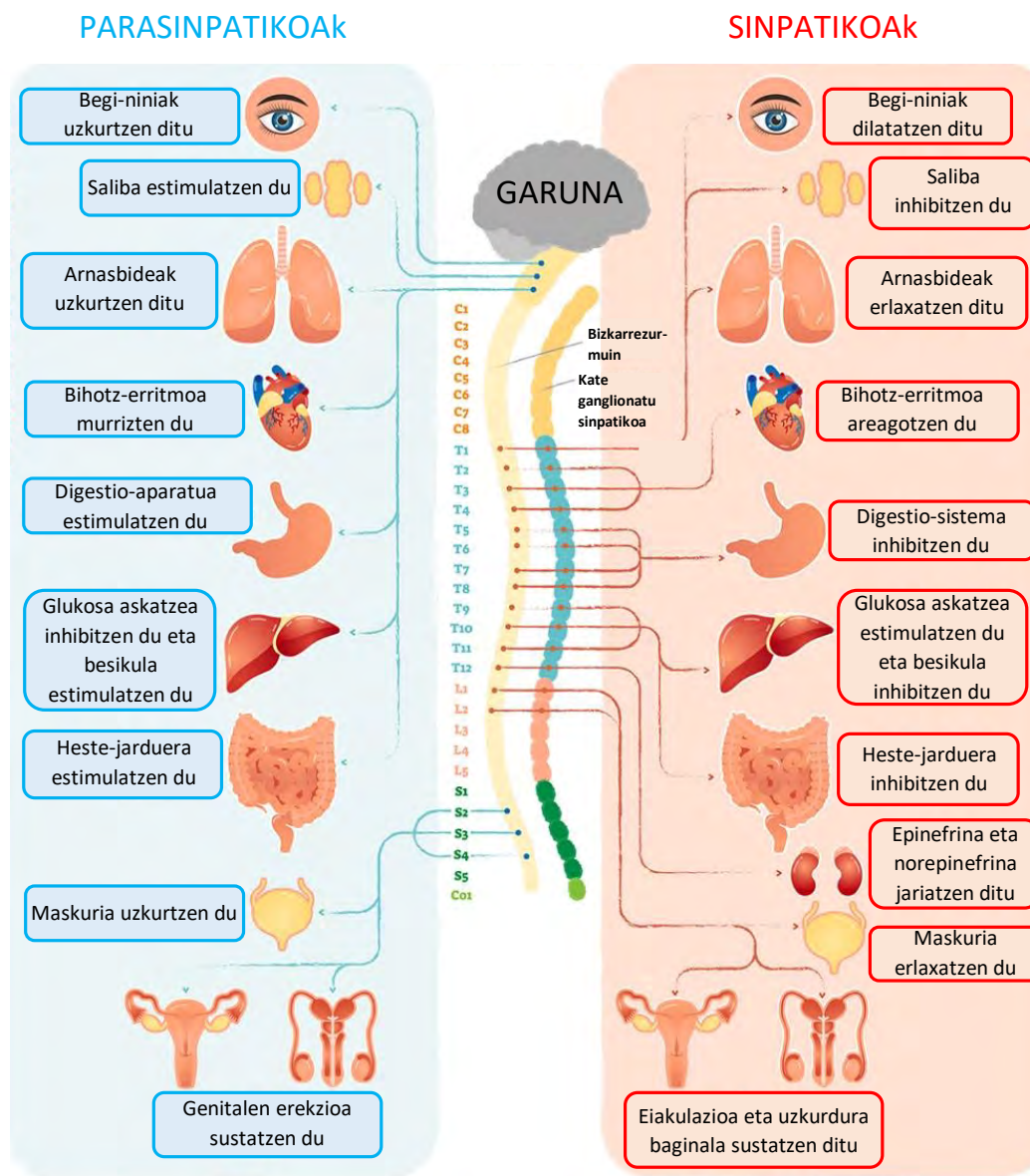
## 2.2. GIZA GORPUTZAREN SISTEMA ORGANIKOAK ETA FUNTZIOAK



**2.13. Irudia:** Zuntz parasinpatiko aferenteen eta eferenteen jatorria eta banaketa.

NSPSren funtzioak *atseden hartu eta digestioaz arduratu* erantzun moduan deskribatzen dira; izan ere, sistema hori aktibatzen denean, bihotz-erritmoa moteltzen da, esfinterrak erlaxatzen dira eta glandula- eta heste-jarduera areagotzen da. Azken emaitza energia biltegitratzea eta gorputzaren funtzioak erregulatzea da, hala nola digestioa eta mikzioa. 2.14. Irudian zehazten dira organismoan gauzatzen diren funtzioetako batzuk NSPS aktibazioaren aurrean.

Nerbio-sistema autonomoaren sistema sinpatiko eta parasinpatikoa aktibatzearen ondoriozko ekintzek zuzeneko elkarketan lan egiten dute, hau da, kontrastatutako ondorioak dituzte, baina oso koordinatuak. Bi sistema horien oreka funtsezkoa da gizakiaren ongizaterako. Elkarren osagarri izan behar dira; beraz, bata estimulazio-funtzioa badu, besteak inhibitu egin beharko du, eta, horrela, jardueraren eta atsedenaren arteko oreka mantentzen da, barne-organoei, guruineki, muskulueki, arterieki eta zaineki erritmikoki lan egitea lortzeaz gain.



2.14. Irudia: Sistema sinpatikoaren eta parasinpatikoaren funtzioak.

## 2.3. Disreflexia Autonomoa

Disreflexia autonomoa (DA), hiperreflexia autonomikoa edo sinpatikoa ere esaten zaiona, gaixotasun larria da, bizkarrezur-muineko lesioa (BML) duten pazienteen artean hilgarria eta arrunta izan daitekeena. Lesioaren mailaren azpitik sortutako estimulu baten aurrean kontrolatu gabeko erantzun sinpatikoa da haren ezaugarria.

Muineko lesioa organismoaren funtzio sentsitibo, motor edota autonomoetan alterazioa eragiten duen prozesu patologikoa da. Funtsean, bizkarrezur-muineko nerbio-ehuna modu konponezinean kaltetzen da, eta sentsibilitaterik eta paralisirik eza eragiten du kaltetutako eremuaren azpitik [26]. Bizkarrezur-muineko lesioa zenbat eta handiagoa eta larriagoa izan, orduan eta handiagoa izango da narriadura funtzionala. Lesioa zerbikala edo toraziko altua bada (T5aren gainetik [3, 27, 28]) kasuen erdian baino gehiagotan garatzen da, [4, 5], kontuan hartuta lesioaren maila zenbat eta altuagoa izan, orduan eta larriagoak izango direla DA gertakariak [29–31].

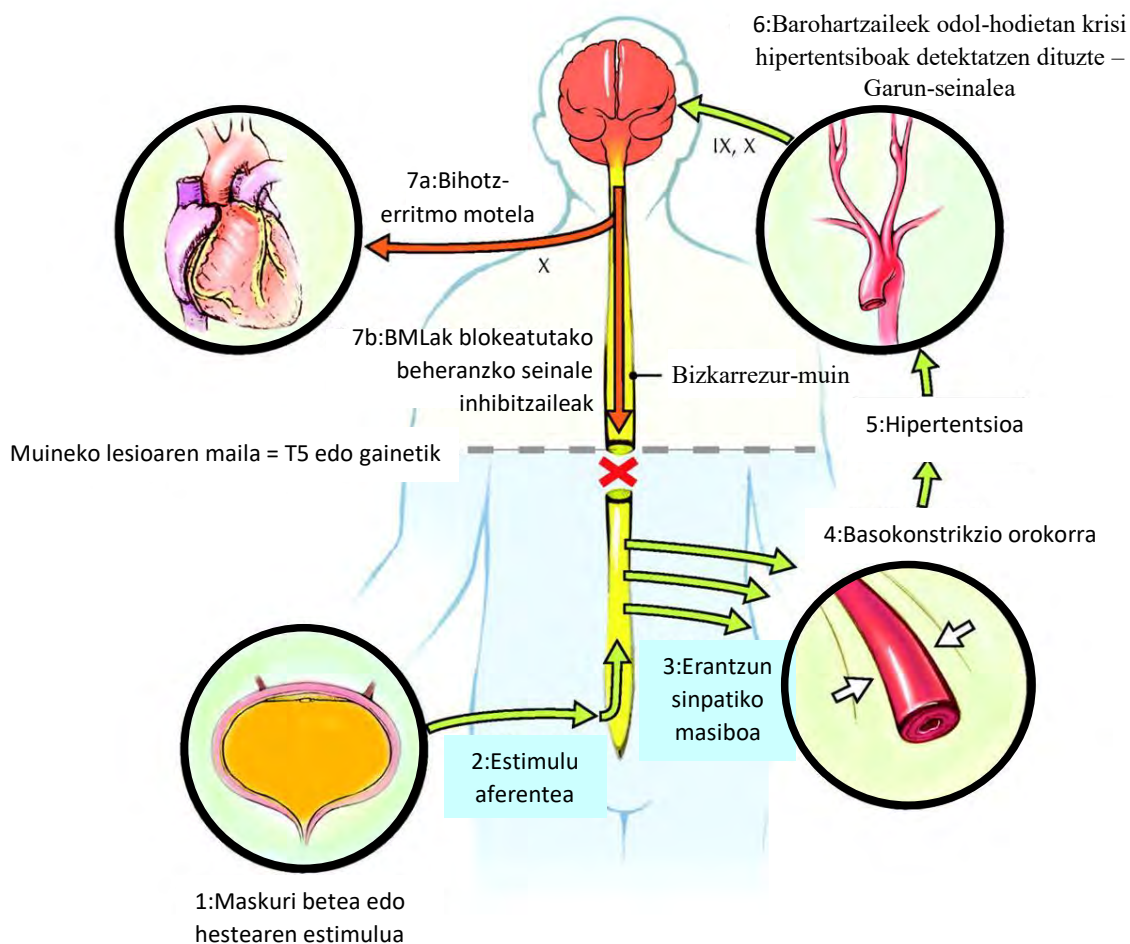
BMLren ondoren, oro har T5 baino lesio handiagoa izanez gero, enbor entzefalikoaren eta dientzefaloaren irteerako fluxu sinpatikoa galdu egiten da. Denborarekin, neurona atseginak kontrolatzen dituzten zirkuitu lokaletan aldaketa plastikoak izaten dira. DA edozein unetan gara daiteke BMLren ondoren, eta, ikuspegi klinikotik, hiperaktibitate sinpatiko baten ondoriozko hipertentsio akutuko gertakariak ditu ezaugarri.

DA gertakariak muineko lesiotik beherako estimulu bat gertatzen denean agertzen dira. Estimulua ez da burmuinera iristen lesio horren presentziagatik, eta erantzun sinpatiko orokor bat sortzen da, basokonstriktzioa eragiten duena, eta horrek, aldi berean, krisi hipertentsiboa eragiten du. Organismoak sistema parasinpatikoa aktibatzen du, eta erantzun parasinpatikoa estimulatzen du, tentsioa handitzeari aurre egiteko. Arazoa da estimulu parasinpatiko hori lesioaren gainetik baino ez dela sortzen, hau da, lesioaren azpitik hiperestimulazio sinpatikoa dago, eta lesioaren gainetik hiperestimulazio parasinpatikoa. [32]-tik ateratako 2.15. Irudian grafikoki irudikatutako agertoki horrek DAren balizko gertakari baten sintomak edo zeinuak agertzea eragingo du [33].

Klinikoki, DA hipertentsio akutuari lotzen da (20 mmHg-ko igoera oinarritzko presio arterialean (PA)), hiperaktibitate sinpatikoaren ondorioz [34, 35]. Sintomarik gabeko pazienteak egon daitezkeen arren, DA gertaera bat jasotzen den unean, ohikoena da zenbait zeinu edo sintoma garatzea, hala nola PA batabatean handitzea, antsietatea, ikusmen lausoa, buruko mina eta bradikardia erreflexua, eta lesioaren mailaren gainetik gorritzea eta izerditzea [36–38].

Lesioaren mailatik beherako edozein estimuluk eragindako edozein unetan gara daiteke DA; ohikoena maskuriaren distentsioa da, kasuen %75etik %85era bitarte [34, 38–40], eta ondoren, eragin fekala. Horregatik, 5. Kapituluaren xehetasun handiagoz ikus daitekeenez, maskuri-betetze artifiziale egingo da, gernukateterren bidez, BMLa duten pazienteengan disreflexia-gertakari bat sorrarazteko helburuarekin.

## 2. KAPITULUA - GIZA GORPUTZAREN ANATOMIA ETA FISIOLOGIA



### 2.15. Irudia: Prozesu disreflexikoaren eskema.

Ondoren, 5.5. Atalean, DA gertaerak detektatzeko sistema bat aurkeztuko da, seinale fisiologikoak biltzean inbaditzaietasuna minimizatuta. Zehazki, pazientei zunda bat jartzea da esperimenziaziotik kendu beharreko zati inbaditzai-lea, pisuzko bi arrazoiengatik. Lehenik eta behin, kontuan hartuta artatu beharreko pazienteen hauskortasuna eta mugikortasun-falta, deserosoa eta zaila zen zunda jartzea, eta ondoeza eragiten zien, gerora aztertu beharreko seinaleetako batzuk jasotzea eragotz baitzezakeen. Bigarren arrazoia da gernu-traktuko infekzioen (GTI) %80 baino gehiagok jatorria duela gernu-zundak erabiltzean [41]; beraz, prozesu hori saihesten bada, parte-hartzaileen osasuna okertzea prebe-nitzen da.

DAa kausa-faktorea ezabatu bezain laster ebazten da. Hala ere, kontrol autonomiko kardiobaskularraren narriadurak BMLa duten pazienteak gertaera bas-kularren arrisku handiagoan jartzen ditu, hala nola, iskemia miokardikoa, garu-neko odoljario hilgarria, entzefalopatia hipertentsiboa, konbultsioak, biriketako edemak eta baita heriotza ere [42, 43]. Horregatik guztiagatik, DA larrialdi me-diko hilgarritzat jotzen da [44].

DA eragiten duten faktoreak ezagutzea funtsezkoa da eragin hori prebenitze-ko. Oro har, prebentzio-neurririk onena maskuria eta hestea behar bezala hustea da, DAren gertakari gehienak lotutako estimuluek eragiten baitituzte.

## 2.4. Egoera emozionalak

Giza gorputzaren ulermena eta emozioekin duen harremana etengabeko bi-lakaera izan da zientziaren eta medikuntzaren historian. Mendeetan zehar adi-menaren eta gorputzaren arteko dikotomia bat mantendu zen, bi alderdi horiek entitate bereizi gisa tratatuz. Azken hamarkadetan, ordea, paradigma-aldaketa esanguratsua sortu da. Aldaketa horren ardatza izan da giza gorputza entitate integrala dela eta osasuna eta emozioak lotuta daudela ondorioztatzea.

Horregatik, adimen emozionalaren garapenak funtsezko zeregina du emo-zioak ulertzeko eta emozioen aurrean erantzuna kudeatzeko [45]. Garrantzitsua da nabarmentzea erantzunen kudeaketak funtsezko elementuak dituela, hala nola, autoerregulazio emozionala, enpatia eta hainbat egoera emozionali modu egokian erantzuteko gaitasuna. Norbera sentitzen dena erabat aitortzeko gai de-nean, emozioei modu oso eraginkorrean heltzeko gaitasuna lortzen da eta, horri esker, emozio negatiboen ondorio kaltegarriak murrizteko neurri zehatzak har daitezke, ongizatea eta osasuna oreka ezin hobean mantentzen lagunduz [46].

Pertsona baten egoera emozionala sakonago ulertzeko tresna bat emozioek gorputzean eragiten dituzten erantzun fisiologikoak aztertzea da. Emozioek, es-perientzia subjektiboak badira ere, zenbait aldaketa eragiten dituzte jarduera fisiologikoan. Erritmo kardiakoa, presio arteriala, jarduera zerebralaren ereduak, azalaren konduktantzia eta maila hormonalak dira emozioek eragiten dituzten aldagai ugarietako batzuk [47, 48].

Horrela, bada konputazio fisiologikoaren eremuko adar bat, giza gorputzaren aldagaietan patroi espezifikokoak identifikatu eta hautematen dituen, emozio bat edo beste sentitzen ari dela ondorioztatzeko. Era berean, erlazio horiek ohiko emozio garbiak ez diren egoera mentalak identifikatzeko ere erabil daitezke, erla-xazioa eta estresa kasu, aurrerago 6. Kapituluaz azalduko den bezala. Gorputz-erantzun horien ulermen sakonagoa lortzeko, beharrezkoa da 2.2.4. Azpiatalean ikusitako nerbio-sistemari buruzko ezagutzak izatea, baita jarraian deskribatzen diren emozioei, estresari eta erlaxazioari buruzko kontzeptuak ere.

### 2.4.1. Emozioak

Emozioak aztertzea funtsezko zutabea da psikologian eta giza portaerarekin lotutako beste diziplina batzuetan. Historian zehar, *emozio* terminoak bilakaera esanguratsua izan du, bai kontzeptuzko definizioan bai ulermenean, jainkozko azalpenetatik ikuspegi zientifikoagoetara eta diziplina anitzekoetara igaroz. Antzinaroan, emozioak giza portaeran eragina zuten eragin jainkotiar edo espiritual gisa interpretatzen ziren. Filosofo grekoek, Aristotelesek bezala, rol nagusi bat bete zuten emozioen kontzeptualizazioari ekin ziotenean, emozioak identifikatuz eta konbentzitzeko eta erretorikarako funtsezko elementuak zirela argudiatuz [49].

XIX. mendean, emozioen ulermen zientifikoagoranzko aldaketa bat gertatu zen, erantzun fisiologikoak emozioen aurretik daudela proposatzen zuten teoriekin. Hori da *The Principles of Psychology* [50] lanaren kasua, non emozioak erantzun fisiologikoen pertzepzioetik sortzen direla argudiatzen den. XX. mendean hasieran, zientzialariek emozioen garrantzia azpimarratu zuten [51] eta XX. mendean bigarren erdian, Paul Ekman psikologo estatubatuarrek funtsezko zeregina bete zuen osagaietan oinarritutako emozioen teoria garatzean. Aurpegi-adierazpenei buruzko ikerketaren bidez [52] sei emozio unibertsal (tristura, poza, haserrea, beldurra, desira, nazka, interesa eta harridura) identifikatu zituen, emozioak hobeto ulertzen lagunduz. Gaur egun funtsezkotzat jotzen dira biziraupenerako eta garapen pertsonalerako [45, 53].

*Emozio* terminoaren bilakaera historikoa aztertu ondoren, garrantzitsua da azpimarratzea haren definizioa konplexua dela eta ez dagoela aho bateko adostasunik zientzialarien artean. Oro har, emozioek prozesu batzuk dakartzate, eta funtsezko hiru elementuk osatzen dituzte. Lehenengoak osagai kognitiboari egiten dio erreferentzia; osagai horrek egoera bat modu kontzientean edo inkontzientean ebaluatzea eta hautematea eskatzen du. Bigarrena osagai fisiologikoa da, nerbio-sistema autonomoaren nahigabeko aldaketak barne hartzen dituen, hala nola, bihotz-maiztasuna handitzea, izerditzea edo hormonak askatzea. Azkenik, jokabide-osagaia emozioak gorputz-hizkuntzaren, hitzezko komunikazioaren eta ekintzen bidez adieraztean agertzen da, eta horrela, ingurunearekiko elkarreragina errazten da eta emozioei lotutako erantzun fisiologikoak ematen dira.

Emozioek funtsezko hiru funtzio betetzen dituzte: egokitze-funtzioa, pertsonen horiek eragiten dituzten inguruabarretara modu ezin hobean egokitzeko aukera ematen diena; motibazio-funtzioa, jokabidearen energia eta eraginkortasuna handitzen dituen, organismoa beharrian eta jomugak asetzera bideratuz; eta komunikazio-funtzioa, pertsonen barruko eta pertsonen arteko komunikazioa barne hartzen duena, norberaren egoera emozionalari buruzko informazioa emanez eta besteen portaerari eraginez.

Gaur egun, emozioei buruzko ikerketa dibertsifikatu egin da, eta diziplinarteko ikuspegiak haien ulermena aberastu dute, beren ikuspegi zehatzago eta sofistikatuago eskainiz. Neurozientzia, psikologia kognitiboa eta psikologia positiboa bezalako diziplinek, besteak beste, argia eman dute biologiarekin, pertzepzioarekin eta emozioen maneiarekin lotutako gaien buruz. Adimen emozionalaren



garapenaren garrantziari buruzko akordio bat ezarri da. Akordio horrek emozioak onartzearen eta erregulatzearen garrantzia nabarmentzen du, eta horrek, aldi berean, gure eguneroko bizipenen bilakaeran arrakasta izaten laguntzen du [45].

### 2.4.2. Estresa

Historian zehar, *estresaren* kontzeptuak eraldaketa esanguratsua izan du, eta sorreratik aurrera eguneroko erabilera duen hitz gisa ibili da, psikologiaren eta medikuntzaren esparruetan funtsezko zutabe bihurtu arte. *Estres* terminoa XVII. mendeko ingeniartzan eta arkitekturan sortu zen, non materialei aplikatutako presioa edo tentsioa deskribatzeko eta objektuak kanpoko indarrei erantzunez nola deformatzen diren azaltzeko erabiltzen zen. Denborarekin, termino hori medikuntzara, biologiarara eta kimikara hedatu zen.

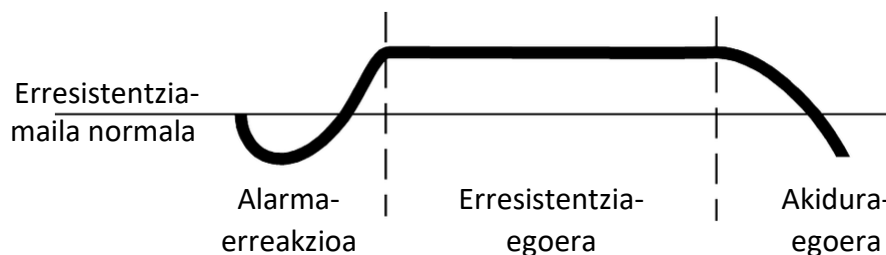
Hala ere, bere benetako eragina XX. mendearen hasieran gertatu zen, Walter Cannonen ikerketa iraultzaileei esker *estres* kontzeptua psikologian zein medikuntzan sartu zenean [54]. Bere ekarpenik esanguratsuen estresari buruzko teoria berritzaile bat garatzea izan zen, egoera potentzialki kaltegarrien aurrean funtsezko egokitzapen-mekanismo gisa, eta aldi berean *homeostasis* kontzeptua txertatu zuen [55].

Homeostasiak, Cannonen definizioaren arabera, organismo baten barneko ingurunearen propietateetan eta konposizioan konstantzia mantentzera bideratutako fenomeno autoerregulatzailen multzoa biltzen du. Bere argudioetan, Cannonek esan zuen pertsona batek egoera arriskutsu bati aurre egin behar dionean, estresa instintuzko erantzun gisa agertzen dela, borroka edo ihesaren bidez, *borroka- edo ihes-erantzuna* deitu izan zaion printzipio bati aurre egiteko. Prozesu horretan, organismoa alarma-fase batean sartzen da, *arousal* deitua. Egoera horretan, nerbio-sistema autonomoa, zehazki bere adar sinpatikoa, aktibatu egiten da. Aldi berean, emozioen prozesamenduan berebiziko garrantzia duen sistema linbikoa martxan jartzen da. Bi sistemek modu harmoniatsuan laguntzen dute organismoaren oreka homeostatikoari eusteko. Aktibazio fisiologiko hori funtsezko osagaia da giza gorputzak arrisku-egoerei berez ematen dien erantzunean, eta funtsezko rola betetzen du estresari eta egokitzapenari buruzko Cannon-en teorian.

XX. mendearen bigarren erdian, estresak osasunean eta portaeran zituen ondorio kaltegarriak aitortzen hasi ziren. Bilakaera horretan funtsezko zeregina Hans Selye endokrinologoak bete zuen, funtsezko kontzeptuak baliatu baitzitu, hala nola *Egokitzapen Sindrome Orokorra* (SGA [56]), estresarekiko etengabeko esposizioaren aurrean gorputzak dituen erantzun sistemikoak deskribatzen dituen, ikus 2.16. Irudia, [57]-tik ateratakoa. Bere obran, *The Stress of Life* [58], Selyek estresa definitu zuen gorputzak edozein eskariri emandako erantzun ez-espezifiko gisa, eta *estresatzaile* terminoa sortu zuen estresa eragin zuen agentea identifikatzeko. Erantzun ez-espezifikoari dagokionez, Selyek adierazten du gorputzak erreakzio komuna eta orokorra duela estresaren aurrean, eta antzera agertzen dela hainbat egoera estresagarritan, organismoak aurre egiten dion eskariaren edo estresatzailearen izaera zehatza kontuan hartu

## 2. KAPITULUA - GIZA GORPUTZAREN ANATOMIA ETA FISIOLOGIA

gabe. Kontzeptu horiek estres terminoa psikologian eta medikuntzan sartzeko oinarriak ezarri zituzten.



**2.16. Irudia:** Egokitzenen Sindrome Orokorraren (SGA) irudikapen grafikoa.

XX. mendearen amaiera aldera, estresaren ikerketan bi ikuspegi kontzeptual berri sortu ziren. Lehenengoak inguruaren garrantzia eta gertaera baten balorazio kognitiboa azpimarratu zituen, estres-erantzun bat eragiteko [59]. Horrela, egoera baten pertzepzioa eta ebaluazioa estresagarria den ala ez zehazteko ezinbestekoa den ideia sartu zuen, balorazio kognitiboaren eta egokitzenen garrantzia azpimarratuz. Bestalde, bigarren ikuspegiak estres positiboa (*eustres*) eta estres negatiboa (*distrés*) bereizi zituen [60]. Lehenengoa honela defini daiteke: eguneroko egoeretan izaten den antsietatea edo urduritasuna, adibidez, azterketa bat egitean, lana pilatzen denean edo leku konkretu batera iristeko presaka ibiltzean. Bigarrena, aldiz, larritasunarekin lotzen da, hau da, pertsonak jota edo irrikaz sentitzen diren egoerekin, sintoma fisikoak eta psikologikoak agertuz, hala nola insomnia, buruko minak edo tentsio arterialeko aldaketak.

Gaur egun, organismoaren erreakzio natural eta beharrezko gisa ulertzen da estresa, oreka emozionalari edo fisikoari aurre egiten dioten egoeren aurrean. *Estresatzaile*ekiko erantzun fisiologiko eta psikologikoak eskatzen ditu, barnekoak edo kanpokoak izan daitezkeenak, eguneroko erronketatik hasi eta egoera bizietaraino. Estresak osagai psikologikoak hartzen ditu, antsietatea edo suminkortasuna bezalako emozioetan islatzen direnak, baita erantzun automatikoak biltzen dituzten osagai fisiologikoak ere, hala nola bihotz-maiztasuna areagotzea eta estresaren hormonak askatzea. Gainera, jokabide-osagai bat du, portaeran aldaketak eragiten dituena, hala nola egoera estresagarriak saihestea. Bi estres mota bereizten dira: akutua, iraupen laburrekoa eta egoera estresagarriari berehalako erantzuna ematen diena, eta kronikoa, estresatzaile etengabeen ondorioz irauten duena. Estresak, batez ere kronikoak, eragin negatiboa izan dezake osasunean [61], antsietate-nahasmenduak, depresioa, hipertentsioa, arazo kardiobaskularrak eta nahaste gastrointestinalak eraginez. Estresaren kudeaketa eraginkorrek berekin dakar aurre egiteko teknikak aplikatzea, hala nola meditazioa eta jarduera fisikoak, laguntza sozialarekin eta autozainketarekin batera, ongizate fisiko eta mental egokia mantentzeko.

Gaur egungo gizartean, estresa kezka esanguratsua bihurtu da. Eguneroko bizitzan teknologiarekiko mendekotasun gero eta handiagoak eta informazio digitalaren aldeak pertsonen eskari kognitibo eta emozionalak areagotzen laguntzen dute. Komunikazio digitalekin egunean mantentzeko presioak zein jakinarazpenekiko etengabeko esposizioak tentsioak, antsietatea eta agorpena sor ditzakete, eta *estres teknologikoa* gisa ezagutzen den fenomenoaren sorrarazten dute. Hain handia da estres mota horren eragina, ezen ikertzaileek aktiboki aztertzen baitituzte estres mota berri honek osasun mental eta fisikoa dituen ondorioak [62]. Testuinguru horretan, Ikaskuntza Automatikoko teknikak aplikatzea funtsezkoa da, datu-multzo handiak aztertzeko gaitasuna baitu, faktore sozial, psikologiko eta biologikoen eta estresaren arteko erlazioan eredu konplexuak identifikatzeko. Zenbait ikerketaren helburua estresa identifikatzea da, hainbat seinale fisiologiko eta datu biometriko aztertuz, hala nola bihotz-maiztasuna, bihotz-erritmoaren aldakortasuna eta gorputz-tenperatura. Ikasketa horiek Ikaskuntza Automatikoko teknikak erabiltzen dituzte seinale horiek ebaluatzeko eta sailkatzeko [63–65].

### 2.4.3. Erlaxazioa

Ezin da ukatu estresak eta emozioek berebiziko garrantzia dutela pertsonen eguneroko bizitzan, eta eragin handia dutela haien osasun mentalean eta fisikoa. Era berean, erlaxazioak, estresari edo tentsio-egoerei aurre egiteko estrategia gisa, ongizate psikologiko eta fisiologikoari eusteko funtsezko osagaia dela erakutsi du [66].

Erlaxazio-erantzunaren kontzeptua (RResp) Benson kardiologoak sartu zuen 1970eko hamarkadan, *borroka- edo ihes-erantzuna* ezagunaren aurkako erantzun fisiologiko gisa [67]. RRespak gorputzeko estres-erantzunak indargabetzen ditu, ongizatea sustatuz eta estres kronikoaren ondorio negatiboak murriztuz. Erlaxazio-praktikek gorputzaren erantzunean duten eragina nerbio-sistema autonomoaren sistema sinpatikoaren eta parasinpatikoaren arteko elkarreaginean oinarritzen da. Sistema horrek gorputzaren nahi gabeko funtzioak arautzen ditu. Erlaxazioan, arnasketa sakona eta meditazioa bezalako teknikak sistema sinpatikoa desaktibatzen dute, estresaren hormonon askapena gutxituz eta lotutako aktibazio fisiologikoa murriztuz. Aldi berean, sistema parasinpatikoa, *atsedenerako eta digestiorako erantzuna* delakoari lotua, aktibatzen da bihotz-maiztasuna murriztea eta muskuluak erlaxatzea erraztuz. Laburbilduz, erlaxazio-tekniken helburua sistema autonomo horien jarduera orekatzea da, egoera fisiologiko egokia sustatuz lasaitzeko, indarberritzeko eta estresa murrizteko. Arnasketa sakona, meditazioa eta yoga praktika horien adibide dira.

Baina erlaxazioa, adiera zabalenean, estresa murrizteko baliabidetzat ez ezik, bizi-kalitatea hobetzeko funtsezko azturatzat ere hartu behar da. Erlaxatzeko ohitura izateak ongizate fisikoa eta emozionala orekatzen laguntzen du. Jarraian, erlaxazioa bizi-estilo osasungarri baten funtsezko osagai bihurtzeko arrazoi batzuk azalduko dira.

Alde batetik, erlaxazio-teknikak erregulartasunez erabiltzeak kontzientzia emozional handiagoa sustatzen du. Emozioak modu eraginkorragoan identifikatzen eta kudeatzen laguntzen du, eta horrek harremanak sendotu eta bizitzan

## 2. KAPITULUA - GIZA GORPUTZAREN ANATOMIA ETA FISILOGIA

---

gogobetetzea areagotu dezake. Erlaxazioak, askotan, bakardadea eta lasaitasuna eskatzen ditu, eta horrek hausnarketa eta autoebaluazioa errazten ditu; gainera, kontzentrazioa eta buru-argitasuna hobetu ditzake. Burua tentsiotik eta kezkatik askatzean, erabaki informatuagoak har daitezke eta produktibitatea handitu. Prozesu horrek helburuak, nahiak eta balioak hobeto ulertzen lagun dezake, eta horrek, aldi berean, bizitza gogobetegarriagoa lortzeko gida gisa balio du.

Nabarmendu behar da erlaxazio-teknikek estresari modu eraginkorragoan aurre egiteko beharrezko tresnak ematen dituztela, eta horrek, azken batean, oztopoak eta ezbeharrak gainditzeko gaitasuna indartzen du [66]. Adibidez, estresak eta antsietateak insomnia eragiten duten kasuetan, erlaxazio-teknikak erabiltzeak loaren kalitatea hobetzea dakar. Lo-indarberritzaile horrek, era berean, estresaren kudeaketa eraginkorragoa eta oro har ongizate handiagoa lortzen laguntzen du [68].

Era berean, garrantzitsua da azpimarratzea erlaxazioa seinale fisiologikoen bidez identifikatzeak funtsezko garrantzia duela sofrologian, meditazioan eta beste ikuspegi terapeutiko batzuetan. Prozesu horrek, dauden praktikak baliozkotzeko eta hobetzeko oinarri zientifikoa ezartzeaz gain, tratamenduak modu pertsonalizatuan egokitzeko aukera ematen du, pertsonen ongizate orokorrari lagunduz.

## 3. Kapituluia

# Seinale fisiologikoak

### 3.1. Sarrera

Giza gorputzetik datozen bioseinale edo seinale fisiologikoek organismoaren sistema jakin batzuen funtzionamenduari buruzko informazioa ematen dute. Etengabe neurtu eta kontrolatu daitezkeen seinaleak dira, aztertu beharreko sistema biologikotik informazioa ateratzeko.

Giza gorputzean neur daitezkeen seinale fisiologikoak ugariak dira: elektrokardiograma (EKG), elektromiograma (EMG), elektroentzefalograma (EEG), jarduera elektrodermikoa (EDA), gorputz-tenperatura, bihotz-maiztasuna, bihotz-impedantzia, arnas maiztasuna, tentsio arteriala, etab.

Ondorengo ataletan zehatz-mehatz deskribatzen dira tesi hau lantzeko jorratu diren lau bioseinaleak.

### 3.2. Elektrokardiograma

EKG bioseinale bat da, bihotzaren jarduera elektrikoa modu sinple eta ez-inbaditzailean neurtzen duena. Bihotzaren taupada bakoitzak seinale elektriko bat sortzen du, bihotza zeharkatzen duena. EKGren helburu nagusia taupadaren erritmoa eta intentsitatea zehaztea da.

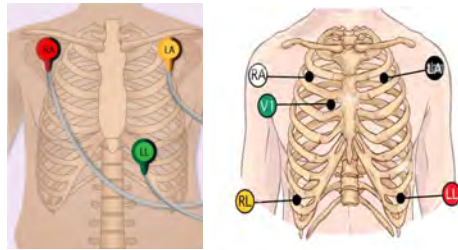
XIX. mendearen azken erdian bihotzaren jarduera elektrikoari buruzko lanak egin ziren bihotzeko potentzialen zuzeneko grabazioen bidez. XX. mendearen hasieran, bihotzaren aktibitate elektrikoa erregistratzea lortzen zuten soka-galbanometroa bezalako metodo zuzenak erabili ziren. Aurrerapen horien ondoren, EKG sortu zen, eta konputagailu bidez prozesatzen zen lehen seinale bioelektrikoa eta ohikoena bihurtu zen. Proba edo test diagnostiko kardiako gisa erabili zen [69].

Osasunaren esparruan eta, zehazki, EKGren seinaleari dagokionez, teknologiaren garapenak etengabe egin du aurrera azken bi mendeetan [69–71]. Egungo medikuntzan izandako aurrerapen horiek agerian uzten dute EKGren garrantzia. EKGren seinale fisiologikotik abiatuta, bihotzeko jarduera elektrikoari bu-

### 3. KAPITULUA - SEINALE FISIOLÓGIKOAK

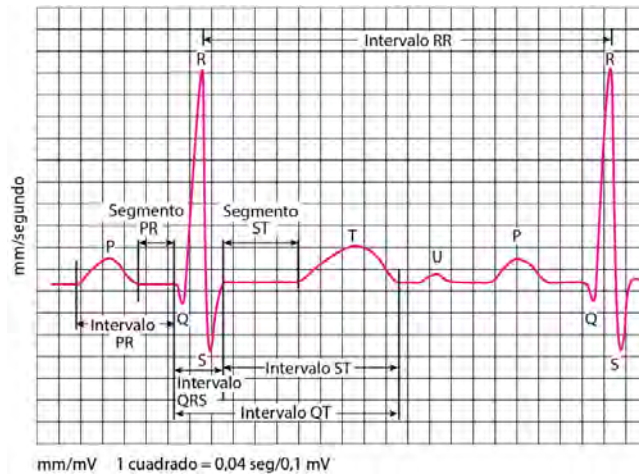
ruzko informazioa ateratzeko aukerak handitzeak ezinbesteko seinale bihurtzen du, gaixotasun miokardikoei buruzko gertakarien presentzia eta larritasuna aurreikusteko eta zehazteko.

[72] eta [73]-etatik lortutako 3.1. Irudiak erakusten duen bezala, bihotzaren seinale elektrikoak bularreko larruazal garbiaren eta, batzuetan, gorputz-adarren gainean elektrodo batzuk jarriz jasotzen dira. Seinale elektriko horiek eremu elektriko bat sortzen dute, eremu kardiakoa deritzona. Eremu hori, organo horri eragiteaz gain, organismoaren beste egitura batzuetatik ere dabil, hala nola biriketarik, odoletik eta muskuluetatik.



3.1. Irudia: 3 eta 5 deribazioko elektrodoak jartzea.

Elektrodoak kableatu bidez lotzen zaizkie jasotako seinaleak anplifikatu, iragazi eta erakusteko ardura duten hardware-gailuei. Jasotako informazioa interpretatzeko, konputarizatutako sistemek seinale horiek digitalizatu, biltegitatu eta prozesatzen dituzte, EKGren bidez modu bisualean interpretatu ahal izateko (ikusi 3.2. Irudia, [74]-tik lortua).



3.2. Irudia: Elektrokardiograma (EKG).

EKGa taupada-bihotzaren funtzionamendua adierazten duten deflexio edo uhin batzuek osatzen duten bioseinale bat da. Jarraian, uhin horien esanahia labur-labur azalduko da.

P uhina da EKG batean agertzen den lehen deflexio positiboa (gorantz). Aurikulak uzkurto eta odola bentrikuluetara bidaltzen den aldia adierazten du.

Uhin horren ondoren, PR segmentua dago, aurikulak hustu direnetik bentrikuluak uzkurto baino lehen dagoen denbora-tarteari dagokiona.

Jarraian, QRS denbora-tartea dago. Bentrikuluak uzkuratzen diren unea irudikatzen du, barruan dagoen odola kanporatuz. Tarte honek Q, R eta S uhinak hartzen ditu. Lehenengoa bentrikuluaren despolarizazioaren ondorioz sortzen den uhin negatiboa da. R eta S uhinek miokardioaren uzkurdua adierazten dute; Lehenengoa EKGren deflexio positibo handiena da, eta bigarrena R uhinaren ondorengo edozein uhin negatibo.

Denbora-tarte horren ondoren, diagnostikoak egiteko oinarrizko tresna gisa definitutako ST segmentua dugu, haren goratzeak edo jaitsierak gutxiegitasuna ekar baitezake bihotzaren ureztatzean.

Hurrengo deflexioa T uhina da, bentrikuluetan zegoen odola kanporatu ondoren bihotza lasaitu zen unearen adierazgarri. Normalean uhin positiboa izaten da.

EKGan agertzen den azken uhina U-a da, eta odola arteria koronarioetan eta odol-hodietan garraiatzen duen bulkada irudikatzen du. Deflexio hori bigarren bihotz-zaratarekin hasten da, eta T uhina oinarri-lerrora edo hortik gertu itzultzen denean.

Aurreko paragrafoetan deskribatutako deflexioak eta denbora-tarteak taupada bakoitzean agertzen diren elementuak dira. Atal hau amaitzeko, egileak ondoz ondoko bi taupada erlazionatzen dituen denbora-tarte bat nabarmentzen du: RR tartea. Denbora-tarte hori bat dator ondoz ondoko bi R uhin arteko distantziarekin, hau da, bi taupadaren arteko tartearekin. Haren iraupena bihotz-maiztasunaren arabera da, eta oso seinale erabilgarria da, bi taupadaren arteko neurketei egiten baitie erreferentzia, informazio garrantzitsua emanez.

### 3.3. Presio arteriala

Presio arteriala (PA), odol-presioa ere esaten zaiona, bihotzak ponpatutako odol-kantitateak eta arterien jarioarekiko erresistentziak zehazten dute. Hau da, odolak arteria izeneko odol-hodien hormen gainean zirkulatzean eragiten duen presioa edo tentsioa da. Bihotzak ponpatzen duen odol-kantitatea zenbat eta handiagoa izan, eta odol-arteriak zenbat eta estuagoak izan, odol-presioa orduan eta handiagoa izango da.

Giltzurrunak giza gorputzaren PA kontrolatzeaz arduratzen diren organoak dira. Horiek zehazten dute organoetara iristen den odol-presioa. Balio txikia edo altua bada, giltzurrunak odolean bidaiatzen duen hormona antidiuretikoak sortzen du, eta, horri esker, arteriak lasaitu edo uzkurto egiten dira presioa erregulatzeko.

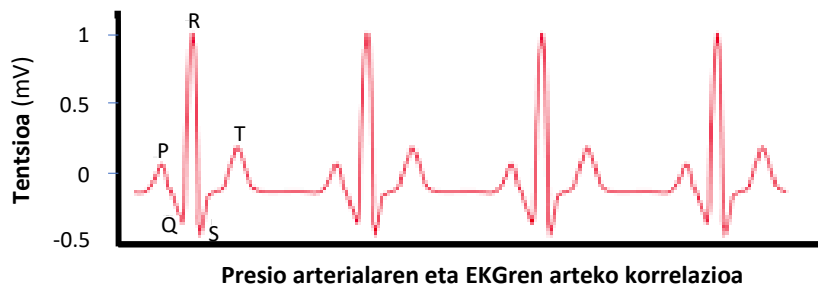
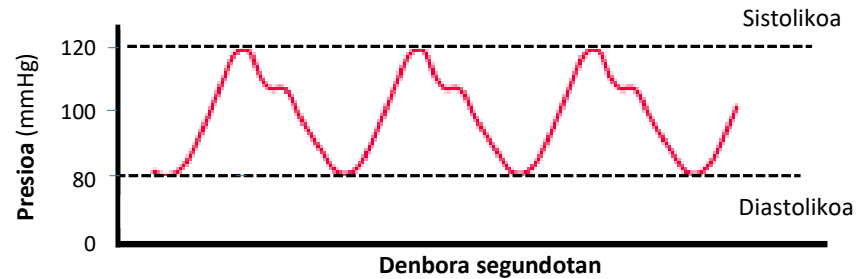
### 3. KAPITULUA - SEINALE FISIOLOGIKOAK

Presio arteriala bi parametrotan oinarrituta ebaluatzen da. Lehenengoari presio arterial sistolika (PAS) deitzen zaio. Presio hori arteria batean eragindako tentsioak eragiten du, bihotza uzurtzen denean odola kanporatzeko. Bigarrena presio arterial diastolika (PAD) dagokio, bihotza lasaitzen denean arteria batean egindako presioak eragindakoa. Lagunarteko hizkuntzan, presio sistolika eta diastolika presio altua eta txikia esaten zaie, hurrenez hurren, lehenengoa bigarrena baino handiagoa baita zenbakiz.

PA merkuriozko milimetrotan neurtzen da (mmHg). Pertsona osasuntsu bantentzat balio normalak 120 mmHg (16 kPa) dira sistolikarentzat eta 80 mmHg (11 kPa) diastolikarentzat. Presio arterial sistolika balio handiegiak zein diastolika balio oso baxuak arazo kardiobaskularrak eragin ditzakete.

Pertsona baten odol-presioaren balioak modu erraz eta ez-inbaditzailean lortzen dira tentsiometroen bidez. Bere funtzioa odolak arterietan eragiten duen presioa neurtzea da, bi une zehatzetan. Lehen unean bihotza lasaitzen da, odolez bete dadin. Bigarrena bihotza uzurtzeko uneari dagokio, odola kanporatzeko. Tensiometroa besoko batez osatuta dago. Besoan ukondoaren gainetik 2 cm inguru jartzen da, eta konprimitu egiten da zirkulazioa eten arte. Une horretan puzten hasten da eta PAren neurriak hartzen dira.

3.3. Irudian, [75]-tik ateratakoan, pertsona osasuntsu baten PAri dagokion seinale fisiologikoa bistaratzen da. Irudi horretan bertan agertzen da EKGa ere, eta, horri esker, presioaren seinalea ondoz ondoko taupadetan lotu daiteke.



**3.3. Irudia:** Ondo ondo taupadetan jasotako presio arteriala.



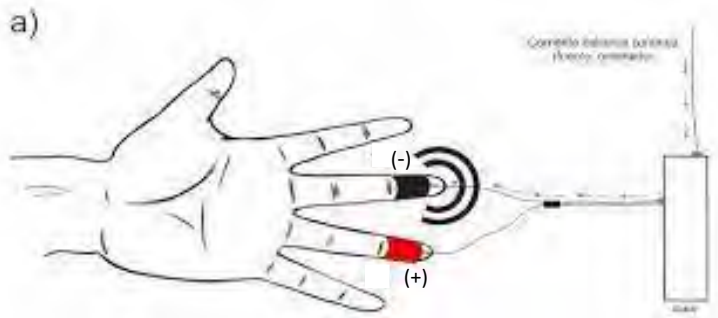
### 3.4. Jarduera elektrodermikoa

Larruazalaren jarduera elektrodermikoa (EDA) izerdi-guruinen erantzunarekin lotutako seinale fisiologiko bat da, lehenago tesi honen 2.2.1. Azpiataleko 2.1. Irudian erakutsia. Izerdi guruinen inerbazio sinpatikoaren adierazpen elektrikoa da [76], eta izerdia sortzean larruazalaren propietate elektrikoaren aldaketa irudikatzen du.

Giza ehunetako elektrizitatea asko aztertu da XIX. mendetik [77–79]. Bioelektrizitateari buruzko ikerketa berriak alternatibak sortzen ari dira osasunaren arloan. Jarduera elektrodermikoa seinale bioelektrikoetatik abiatuta diagnostiko eta tratamenduetan ebidentzia ugari dituen aplikazio ugarietako bat baino ez da [80]. Neurketan sentsibilitate handia du eta bere aldaketak pertsonaren egoera kognitibo eta emozionalarekin erlazionatzen dira [81]. Azken hori dela eta, EDA batez ere estresa neurtzeko erabili da [82–84].

Garrantzitsua da aipatzea giza larruazala bere forma puruan (elementu hidrolipidorik edo elektronegatibitate-propietateak dituzten agente arrotzik gabeko) ez dela karga elektrikoaren eroale ona [85]. Korne-geruzak menderatzen ditu larruazalaren propietate elektrikoak: eroankortasuna eta erresistentzia. Azken hori aldatu egiten da keratina epidermikoaren geruzaren lodieraren, garbiketaren eta lehortasunaren arabera [86]. Larruazalaren erresistentziari eragiten dion beste faktore bat izerdi-guruinen aldizkako kitzikagarritasun irregularra da. Izerdia honela osatuta dago: uraren %99 eta mineralen %1: gatzak, elektrolitoak edo ioiak. Mineral horiek, ingurune urtsuan diluituak, korrante elektrikoa elektrodo negatibotik (katodoa) positibora (anodoa) zirkulatzea ahalbidetzen dute, emaitza gisa zelula elektrolitiko baten eredu bidimentsional moduko bat emanez [85].

EDAREN neurketa esku ahurraren edota atzamarren gainean elektrodoak jarri egiten da, 3

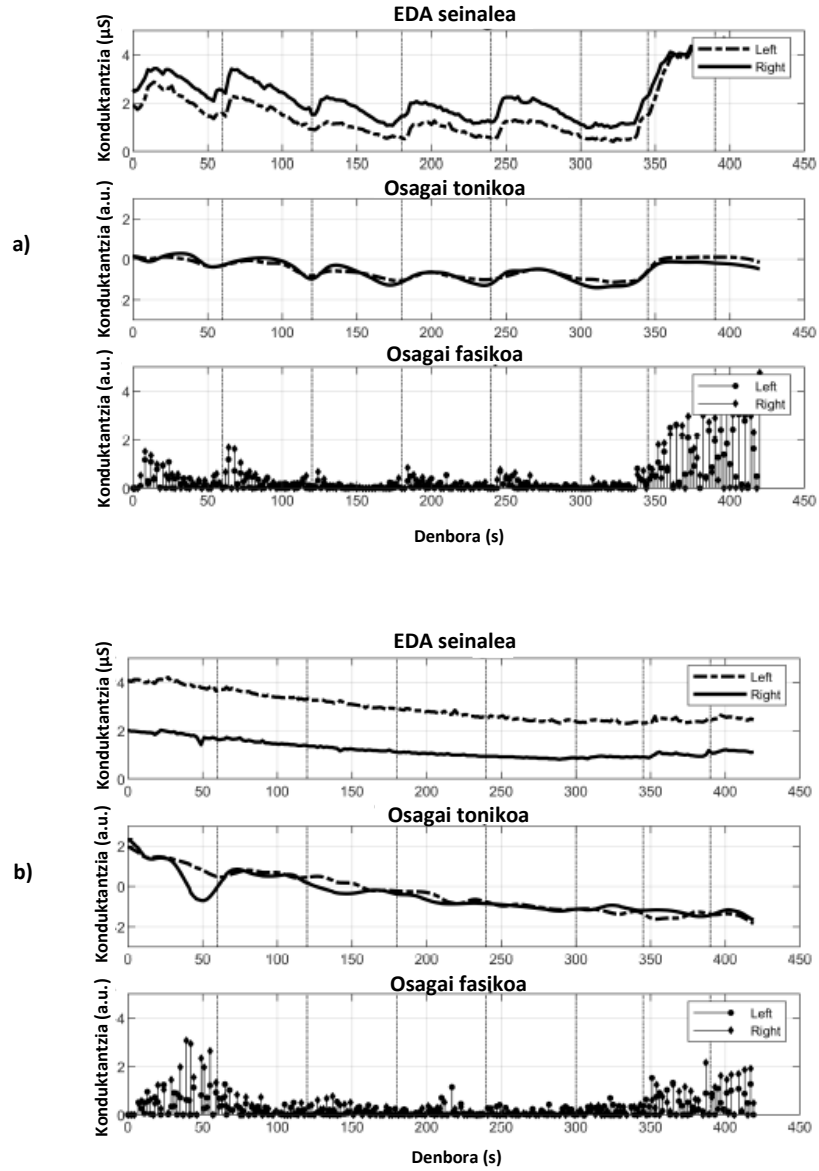


3.4. Irudia: EDA jasotzeko elektrodoak jartzea.

EDA batez ere bi osagaik eratzen dute: tonikoak eta fasikoak. 3.5. Irudiak, [87]-tik ateratakoak, aldaketa moteleko jarduera sinpatiko tonikoa zein aldakuntza azkarreko jarduera fasikoa islatzen ditu. Jarduera sinpatiko tonikoa aldakuntza geldoekin lotuta dago eta maila elektrodermikoko unitateetan adie-

### 3. KAPITULUA - SEINALE FISIOLGIKOAK

raz daiteke (SCL). Aitzitik, jarduera fasiko sinpatikoa aldakuntza azkarrekin lotuta dago eta erantzun elektrodermikoaren unitateetan adierazten da (SCR) [76].



**3.5. Irudia:** EDA seinale fisiologikoa bere bi osagaiekin. a) Irudia. Kanpoko estimuluaren eraginpean dagoen subjektua. b) Irudia. Estimulurik gabeko subjektua.

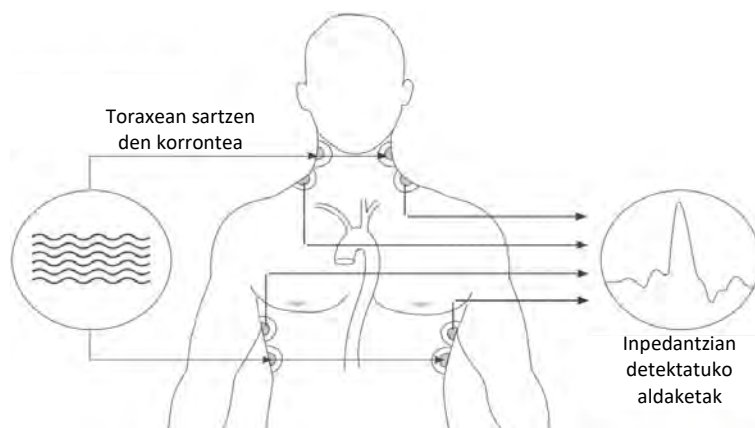
### 3.5. Bihotzeko inpedantzia

Bihotz-inpedantzia teknika ez-inbaditzailea da, taupadaka egindako gastu kardiakoa azkar, etengabe eta erreproduzitzeko moduan zehaztea ahalbidetzen duena. Bihotz-zikloan aortako odol-bolumenaren aldaketen ondorioz toraxaren erresistentzia elektrikoan gertatzen diren aldaketak neurtzen ditu. Sistolean eta diastolean zehar izandako inpedantziaren edo odol-bolumenaren gorabeheren etengabeko neurketa horri esker, bolumen sistolikoa, gastu kardiakoa, kontraktilitate miokardikoa eta toraxaren fluidoaren guztizko edukia zehaztu daitezke [88].

Bihotzeko gastua teknika ez-inbaditzaileen bidez zehaztea [89] teknika inbaditzaileak aplikatzeko problematika ezabatzen saiatzen da, Swan-Ganz kateterren kasuan bezala [90,91].

Bihotzeko inpedantziaren azterketa eta erabilera etengabe garatu da azken berrogeita hamar urteetan. National Aeronautical and Space Administration (NASA) erakundeko ikertzaileek, William Kubiceckekin batera, bihotzaren inpedantzia egiteko lehen metodo praktikoa garatu zuten 1960ko hamarkadan, toraxeko bioinpedantzia elektrikoaren (TEB) kontzeptua aplikatuz [92].

Gaur egungo inpedantzia-kardiografiako gailuek elektrodo tetrapolarren sistema erabiltzen dute; ikusi 3.6. Irudia, [88]-tik hartua. Bi elektrodoren bidez (bata abdomenaren goiko aldean eta bestea lepoaren goiko aldean) maiztasun altuko eta magnitude baxuko korrante konstante bat sartzen da, toraxean eremu elektriko homogeen bat sortuz. Beste bi elektrodoek, bata lepoaren sustraian eta bestea bularrezurraren beheko muturrean, tentsioaren aldaketak eta elektrokardiogramaren seinalea detektatzen dituzte [89].



**3.6. Irudia:** Elektrodo tetrapolarren sistema. Korrante elektriko toraxera sartzen da kanpoko elektrodoren bidez. Toraxeko korrantearen fluxuarekiko inpedantzia-aldaketak elektrodo barnekoenak detektatzen dituzte.

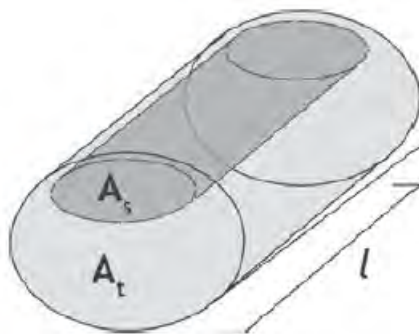
### 3. KAPITULUA - SEINALE FISIOLÓGIKOAK

---

Bihotzeko inpedantziaren kalkulua Ohm-en legean oinarritzen da, ikusi 3.1 ekuazioa, zeinean zirkuito baten terminal baten tentsioaren jauskera ( $E$ ) korronte elektriko baten fluxua ( $I$ ) adinakoa baita, korronte-fluxuarekiko erresistentzia edo inpedantziak ( $Z$ ) zatituta.

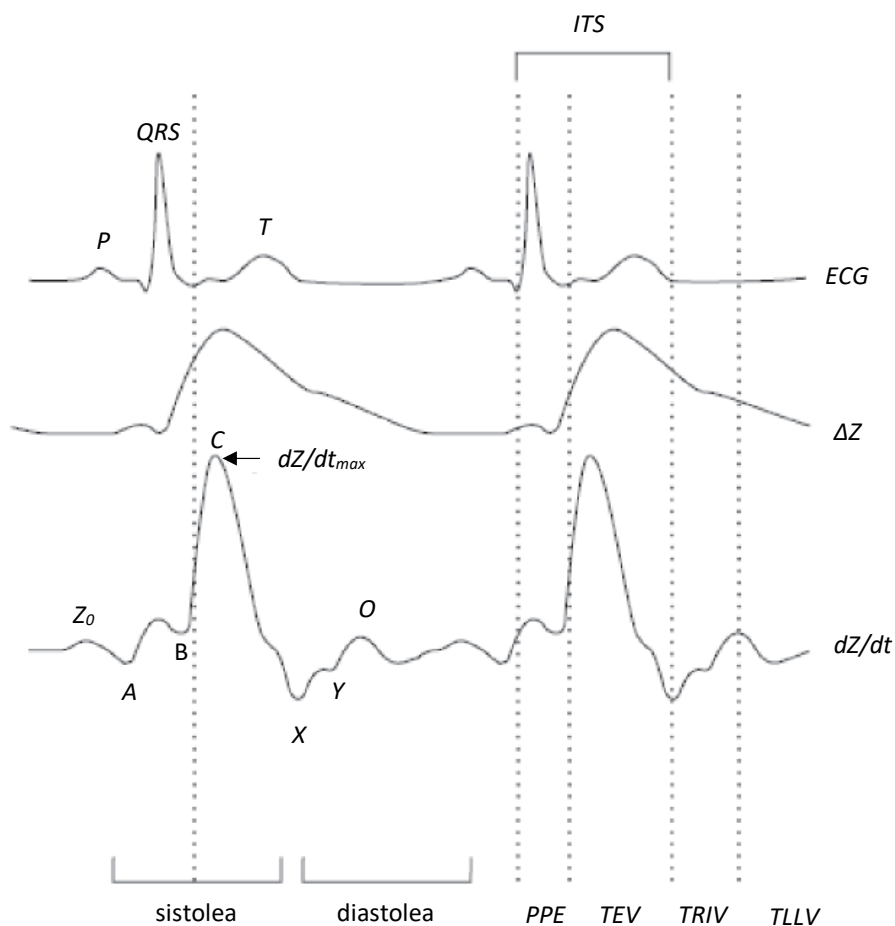
$$I = E/Z \quad \text{o} \quad Z = E/I \quad (3.1)$$

Kubicek-ek, [88]-tik ateratako 3.7. Irudian ikus daitekeen bezala, toraxa eremu sekzionala ( $A$ ) eta luzera ( $l$ ) dituen zilindro soil gisa hartu zuen, eroale elektriko ez-homogeneo gisa balioko lukeena. Planteamendu horri esker, Ohm-en legea aplikatu ahal izan zuen organismoan [93].



**3.7. Irudia:** Toraxaren eredu zilindriko sinplifikatua. As: odolez betetako eremu sekzionala. At: gainerako ehunek okupatutako eremu sekzionala.

3.8. Irudian [88]-tik ateratako bihotz-inpedantziari dagokion bioseinalea bistaratzen da.



**3.8. Irudia:** Inpedantzia-kardiografiaren trazadura eta uhinak.  $Z_0$ : inpedantzia basala; A: uzkurdua aurikularra (sistole elektromekanikoaren hasiera); B: aorta-balbularen irekiera; C: aorta-fluxu gehieneko puntua ( $dZ/dt_{max}$ ), uzkurdua mekanikoa; X: aorta-balbularen itxiera; Y: birika-balbularen itxiera; O: mitral-balbularen irekiera; PPE: aurre-ejekzio-aldia; TEV: ejekzio bentrrikularreko denbora; TRIV: erlaxazio isobolumetrikoko denbora; TLLV: bentrrikulu-betetze-denbora, ITS: denbora-tarte sistolikoa.



## 4. Kapituluia

# Ikaskuntza Automatikoan oinarritutako teknikak

### 4.1. Hitzaurrea

Adimen artifiziala (AA), 1956an Dartmoutheko Konferentzian formalki proposatutako adierazpena [94], informatikaren barruko ikerketa-eremu bat da, eta bere helburua da giza adimenaren esku-hartzea behar duten zereginak egiteko gaitasuna duten sistemak garatzea. Sistema horiek prozesu kognitiboak emulatzen ahalegintzen dira, hala nola arrazoiketa, ikaskuntza, pertzepzioa eta erabakiak hartzea.

AAren helburu nagusia arazoei modu autonomoan eta moldagarrian aurre egin ahal izateko makinak sortzea da, beren esperientziatik ikasiz eta denbora igaro ahala errendimendua hobetuz. Adimen artifiziala sistema oso bat bezala ikusten den arren, egia esan, sistema batean inplementatutako teknologien nahaspila bat da, arrazoitzeko, ikasteko eta arazo konplexuei aurre egiteko aukera emango dioten erabakiak hartzeko gaitze aldera.

AAren esparruan Ikaskuntza Automatikoa (Machine Learning, ML) dago. Giza prozesu kognitiboak emulatzea eta adimena eskatzen duten zereginak egitea bilatzen duten sistemak eta algoritmoak garatzea du helburu, hau da, sistemen ulermen-gaitasuna hobetzea. Algoritmo mota hori aldeztu aurretik biltegi-ratutako datu edo adibideetan oinarrituta ikasten da.

Ondoren, 4.2. Atalean, Ikaskuntza Automatikoari eta haren formei buruzko deskribapen zehatza emango da. 4.3. Atala Gainbegiratutako Ikaskuntzaren eremua osatzen duten algoritmoen azalpen zehatza emateko erabiliko da. Gainera, 4.4. Atalean, sailkatzaileen ebaluazio- eta baliozkotze-prozesua zehaztuko da, baita haien jarduna ebaluatzeko aukera ematen duten hainbat metrikaren azalpena ere. Azkenik, 4.5. Atalean, emaitzen garrantziaren analisisa egiteko tesi honetan erabilitako metodo estatistikoak azalduko dira.

## 4.2. Ikaskuntza Automatikoa

Ikaskuntza Automatikoa AAren adar bat da, makinek datuetatik abiatuta ikasteko eta programazio espliziturik gabe zereginak egiteko aukera izan dezaten. Funtsean, algoritmo matematikoak dira, eta sarrera-aldagaien arabera emaitza lortzea dute helburu.

Ikaskuntza Automatikoak berekin dakar datu-historiko batetik abiatuta ikasteko eta bere burua hobetzeko gai diren algoritmoak garatzea, patroiak ezagutzea eta erabakiak hartzea pertsona baten laguntzarik behar izan gabe. Argibide programatuei jarraitu beharrean, Ikaskuntza Automatikoko algoritmoak datuetara egokitzen dira automatikoki, eta haien errendimendua hobetzen dute, datu gehiago erakutsi eta horiekin entrenatzen diren heinean. Ikaskuntza Automatikoaren ereduak entrenamendu-datuekin algoritmo bat exekutatzearen emaitza dira. Oro har, entrenamendurako zenbat eta datu gehiago erabili, eredu hobea izango da, eta iragarpenak egiteko edo erabaki zehatzak hartzeko gaitasuna izango du.

Laburbilduz, Ikaskuntza Automatikoa analisi-tresna bat da eta datu kopuru handiekin elikatutako algoritmoen bidez giza portaerak imitatzeke gai da. Egoeraren eta erabili diren datuen arabera, algoritmo horiek erabaki desberdinak hartzen ikasiko dute, eta eredu matematiko bat sortuko dute, makinari automatikoki jarduteko aukera emango diona, konpondu beharreko arazora egokituta.

Ikaskuntza Automatikoak funtsezko lau etapa ditu. Lehenengo etapa datuak biltzea da. Bertan, ebatzi beharreko arazoari buruzko datu garrantzitsuak biltzen dira, bai etiketatutako adibideak, bai etiketatu gabekoak. Horrez gain, Ikaskuntza Automatikoko algoritmoetarako aurreprozesuko fase bat edo datuak prestatzeko fase bat izan ohi du. Bigarren etapan, ereduaren entrenamendua deiturikoan, algoritmo egokia aukeratzeko da eta eredu prediktibo bat eraikitzeke entrenamendu-datuetan patroiak eta erlazioak bilatzen dira. Prozesu horretan, algoritmoak bere parametroak doitzen ditu ereduaren zehaztasuna hobetzeko (baliozkotze-datuen bidez). Hirugarren etapa ebaluazioa eta iragarpena da. Bertan, ereduaren errendimendua ebaluatzen da, orain arte erabili ez diren datu gehigarriak erabiliz (test- edo proba-multzoa). Azkenik, laugarren etapan, hau da, ustiapen-fasean, errendimendu egokia egiaztatu ondoren, ereduak datu berrietan eta aurrez ezagutu gabekoetan iragarpenak egiteko gaitasuna du.

Ikaskuntza Automatikoa funtsezko bi kategoriatan oinarritzen da nagusiki: Gainbegiratutako Ikaskuntza eta Gainbegiratu Gabeko Ikaskuntza. Lehenengoan, entrenamendu-fasean, eredu gaitzeko erabiltzen diren datuak alde zurretik etiketatu behar izan dira. Etiketa hori mendeko klasea edo aldagaia da. Bigarrenetan, aldiz, etiketarik ez duten datuetan ereduak eta egiturak bilatzen dira. Hau da, ereduak modu autonomoan ikasten du, aurreikusitako kategoriei edo emaitzei buruzko aurretiazko informazioaren mende egon gabe. Bi modalitateetan, datu batekin lotutako informazioa (patroi bat, kasu bat edo adibide bat) aldagai independenteen bidez adierazten da, atributu edo ezaugarri gisa ere ezagutzen direnak. Hurrengo atalean, Gainbegiratutako Ikaskuntza Automati-

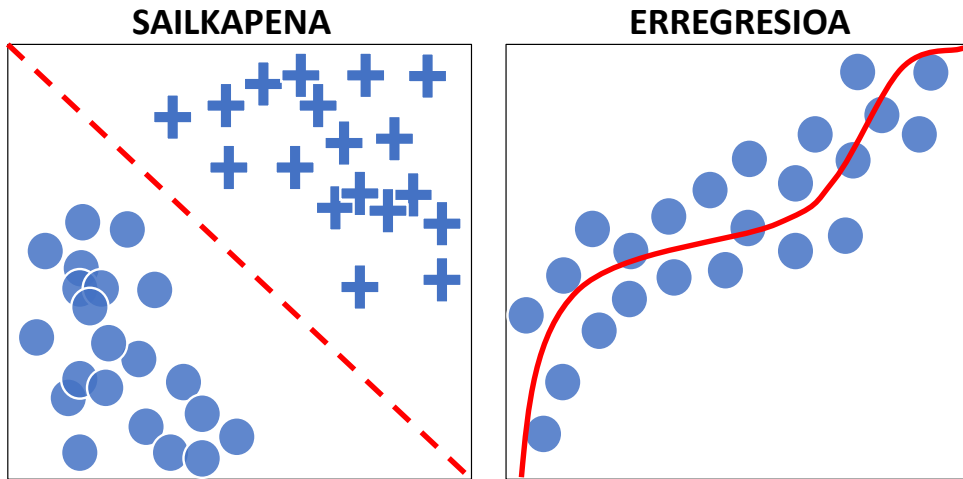


koaren algoritmoak deskribatuko dira, tesi honetan algoritmoak soilik garatzen baitira kategoria honen barruan.

### 4.3. Gainbegiratutako Ikaskuntzako algoritmoak

A algoritmoak adibideak ditu, espero diren emaitzekin batera. Helburua da ereduak sar- algoritmoak ereduak sar- rrerak irteera zuzenekin lotzen ikastea eta datuetan iragarpen zehatzak egin ahal izatea, aurrez ikusi gabeko etiketak jarri gabe. Beste era batera esanda, algoritmoak orokortzeko gaitasuna garatzea da helburua.

Ikaskuntza Automatikoko algoritmoak bi arazo motatan banatzen dira: sailkapena eta erregresioa, ikus 4.1. Irudia [95]-tik aterata. Lehenengo arazoa gertatzen da klasea aldagai diskretua denean eta algoritmoa klase desberdinei elementuak esleitzeaz arduratzen denean, emandako datuetan aurkitzen dituen patroien arabera. Horrela, elementu berri bat zein taldetakoa den iragar dezake. Bestalde, erregresio-arazoa gertatzen da klasea aldagai jarraitua denean eta helburua zenbakizko balio espezifiko bat lortzea denean, elementua talde bati esleitu beharrean. Beste era batera esanda, algoritmoak datuetan oinarritutako estimazio bat egiten du nahi den zenbakizko iragarpena emateko.



4.1. Irudia: Sailkapena (klaseen arteko bereizketa) eta erregresioa (balio jarraitu baten iragarpena) arazoaren irudikapen grafikoa.

4.2. aurreko Atalean deskribatu den bezala, Gainbegiratutako Ikaskuntzako algoritmoek funtsezko lau etapako prozesuari jarraitzen diote. Lehenengo etap- pan, atributuak eta dagozkien etiketak biltzen dira. Gero, bigarren etap- pan, eredu

## 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

---

bat entrenatzen da algoritmo desberdinak erabiliz, eta egokitu egiten da iragarpenen eta benetako etiketen arteko errorea minimizatzeko. Hirugarren etaparen ereduaren ebaluazioa eskatzen du, haren zehaztasuna eta orokortzeko gaitasuna neurtzeko proba-datuaren multzo baten bidez. Azkenik, laugarren etapan, ereduaren datu berrietan iragarpenak egiteko erabiltzen da, eta horri ereduaren ustiatzeko fasea esaten zaio.

Gainbegiratutako Ikaskuntza Automatikoaren esparruan, funtsezkoa da konputazioaren hartzea ez dagoela algoritmo kopuru finkorik, etengabe ari baitira algoritmo berriak eta lehendik daudenen aldaerak garatzen. Algoritmo bakoitzak ezaugarri eta aplikazio espezifikoak ditu, eta aukera egokia arazo motaren, datuen izaeraren eta proiektuaren helburuen arabera izango da. Gainera, lehen esan bezala, posible da algoritmo batzuk elkarrekin konbinatzea edo erabiltzea, zeregin konplexuagoetan errendimendua hobetzeko edo arazo espezifikoetarako modu eraginkorragoan aurrerantzeko. Malgutasunak eta etengabeko bilakaerak aukeratu ematen dute konponbideak kasu bakoitzaren premia berezietara egokitzeko. Jarraian, tesi hau garatzeko erabili ziren Gainbegiratutako Ikaskuntzako algoritmoak deskribatzen dira.

### 4.3.1. One Rule (1R)

One Rule algoritmoa sailkatzeko Ikaskuntza Automatikoko teknika bat da, bere sinpletasunagatik eta interpretatzeko erraztasunagatik nabarmentzen dena. Erraza bada ere, zehatzak eta erabilgarriak diren sailkapen ereduak lor ditzake. Ezaugarri bakar batean oinarritutako arauak ikastera bideratzen da, eta erreferentzia-puntu gisa erabiltzen da hainbat aplikaziotan.

Erabaki-arauak *SI-ENTONCES* adierazpen sinpleak dira, eta baldintza eta iragarpen bat dira [96]. Iragarpen-eredu oso interpretagarriak dira, hizkuntza naturalaren antzeko egitura dutenak. Prozesu induktibo baten bidezko ikasketa da, eta, horri esker, datuetan patroiak eta erlazioak aurki daitezke arau horiek eraikitzeko. Interpretagarritasuna maximizatu egiten da baldintzak ulergarriak eta iraupen laburrekoak direnean, eta arau kopuru mugatua dagoenean. Programazioan, *SI-ENTONCES* arauen formulazioa intuitiboa eta naturala da. Hori horrela, Ikaskuntza Automatikoaren ekarpen berria datuetatik abiatuta arau horiek automatikoki ikasteko gaitasuna da.

1R algoritmoa arauen indukzio-metodo sinpleenetako bat da [97] eta entrenamenduan zehar ereduaren eraikitze modua jarraian deskribatzen den bezala da. Eskura dauden ezaugarri guztietatik abiatuta, 1R-k nahi den emaitzari buruzko informazio gehien ematen duena identifikatzen du, eta ezaugarri horretan oinarritutako erabaki-arauak sortzen ditu. 1R deitzen den arren, *erregela bat* esan nahi duena, benetan erregela bat baino gehiago sortzen du. Zehazki, arau bat sortzen du hautatutako ezaugarri garrantzitsuenaren balio bakar bakoitzerako. Beraz, izen egokiagoa *OneFeatureRules* izan daiteke.

Sailkapen algoritmo hau sinplea eta azkarra da eta hiru etapa nagusitan funtzionatzen du. Entrenamendu-etapan, klasearen arabera atributu-balioen maiztasuna aztertzen du arauak eraikitzeko. Sailkapen-etapan, arau horiek adibide berriei aplikatzen dizkie, klase bat esleitzeko. Azkenik, errendimendua-

ren ebaluazioan, metrikak erabiltzen dira zehaztasun eta recall gisa, sailkapen-lanean duten eraginkortasuna neurtzeko.

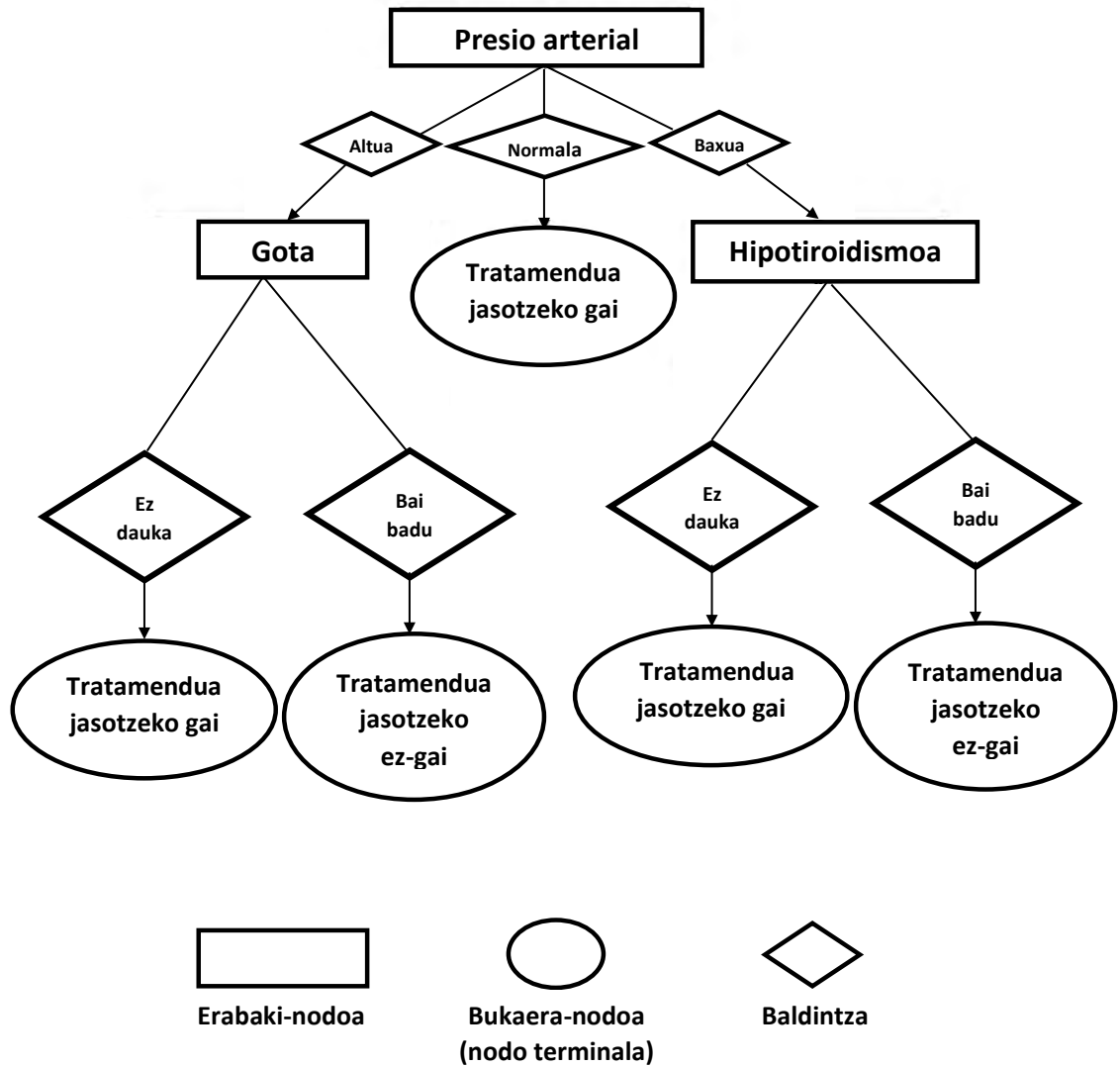
Laburbilduz, 1R algoritmoak atributu baten eta sailkapenerako klasearen arteko erlazio sendoenean oinarritutako erregela sinple bat eraikitzen du. Kasu batzuetan oso erabilgarria izan daitekeen arren, mugak ditu erlazio konplexuagoak alde batera uzten dituelako eta baliteke entrenamendukoak ez diren datu-multzoak ondo ez orokortzea. Murrizketa horiek gorabehera, 1R algoritmoa Ikaskuntza Automatikoaren arloan hasteko aukera gomendagarria da, oinarri sendoa eta ulerterraza eskaintzen baitu. Hala ere, arazo konplexuagoei heltzeko eta sailkapenean zehaztasun handiagoa lortzeko, erlazio konplexuagoei eta sailkapen-zeregin desafiatzaileagoei ekiteko gaitasuna eskaintzen duten algoritmo aurreratuagoak kontuan hartzea iradokitzen da.

#### 4.3.2. Decision Tree (DT)

Erabaki-zuhaitzeko edo sailkapen-zuhaitzeko algoritmoa (Decision Tree, DT) asko erabiltzen da Gainbegiratutako Ikaskuntzan, sailkapena eta erregresioa egiteko, ikuspegi intuitiboa eta ulerterraza duelako [96]. Zuhaitz-egitura hierarkiko batean oinarritzen da, non barne-nodo bakoitzak ezaugarri bat adierazten duen, adar bakoitzak ezaugarri horren balioan oinarritutako erabaki bat adierazten duen, eta nodo terminal edo hosto-nodo bakoitza erregresio-klase edo -balio espezifiko bati dagokion. Zuhaitza eraikitzekeo prozesuan, datuak azpimultzoetan banatzen dira, ezaugarrien mozketa-balioen bidez, eta barne-nodoak eta hosto-nodoak sortzen dira. Orri nodoek iragarpen emaitzak dituzte, nodo horretako entrenamendu datuen batezbesteko gisa kalkulaturik. Horrela, zuhaitzak balioak iragartzeko edo adibide berriak sailkatzeko erabiltzen dira.

Sailkapen-zuhaitz bat eraikitzekeo modua honako hau da: algoritmoak datuak klaseetan edo talde homogeneoetan hobeto bereizten dituen ezaugarria bilatzen du, hainbat metrika erabiliz, hala nola, informazio-irabazia edo Gini indizea. Lehenengo terminoa sailkapen-prozesuan informazio-kopuru handiena zein ezaugarrik ematen duen zehazteko erabiltzen da; bigarren terminoak, berriaz, ezaugarri bat ausaz hautatzean oker sailkatzeko probabilitatea neurtzen du [98, 99]. Ezaugarri onena hautatu ondoren, zuhaitzean nodoak sortzen dira eta entrenamendu-multzoa azpimultzo txikiagoetan banatzen da. Prozesu hori errepikatu egiten da gelditze-irizpide bat bete arte, hala nola aitaren edo semearen nodoaren gutxieneko adibide-kopurua. Azkenik, zuhaitz osoa eraikitzen amaitu ondoren, kasu berriak sailkatzeko prozesua erraza da. Zuhaitzaren egiturari sustraitik hosto bateraino jarraitu behar zaio, adibide berriaren ezaugarriak ebaluatuz eta dagozkion adarrei jarraituz. Azken orrian dagoen erregresio-klasea edo -balioa adibide berriari esleitzen zaio, algoritmoaren iragarpena emanez.

Laburbilduz, erabakiak hartzeko zuhaitzak Ikaskuntza Automatikoko tresnak dira, ezaugarri garrantzitsuetan oinarritutako erabakiak hartzea ahalbidetzen dutenak eta emaitza argiak eta interpretatzeko errazak eskaintzen dituztenak. Bai sailkapenean bai erregresioan aplikatzen dira, hainbat arazotarako konponbide eraginkorrak eskainiz.



4.2. Irudia: Tratamendu medikoen aplikazioari buruzko erabaki-zuhaitza erakitzeko adibidea.

DTek hainbat abantaila dituzte, interpretatzeko eta ikusteko erraztasuna eta zenbakizko datuak zein datu kategorikoak erabiltzeko gaitasuna barne. Hala ere, mugetako bat da datu zaratatsuen multzoak edo dimentsionalitate handi-koak gaindoitzeko joera. Fenomeno hau gertatzen da zuhaitza gehiegi egokitzen denean entrenamendu-datueta, datu-multzo horretan dauden patroia edo zara- rata espezifikoak harrapatuz, datu berriei eta ikusi gabeei aplikatu dakizkiekeen

patroi orokorrak ikasi beharrean. Beste era batera esanda, zuhaitza oso konplexua bihurtzen da eta gehiegi egokitzen da entrenamendu-datuen berezitasunetara, eta horrek eragin negatiboa izan dezake datu ezezagunetan orokortzeko eta doitzeko duen gaitasunean. Arazo hori arintzeko, ohikoa da zuhaitzaren inausketa (pruning) edo zuhaitz-multzoen erabilera bezalako teknikak erabiltzea, hala nola Random Forest edo Gradient Boosting, zuhaitz ugari konbinatzen dituztenak ereduaren zehaztasuna eta orokortzea hobetzeko. Estrategia horiei esker, eredu sendoagoak eta zehatzagoak lortu ahal dira, Ikaskuntza Automatikoko ataza ugaritarako egokiak.

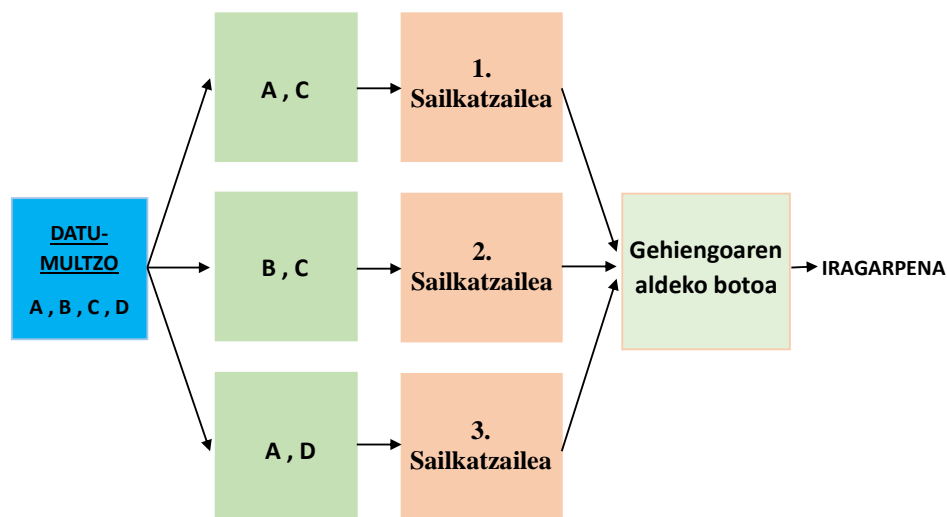
### 4.3.3. Zuhaitzetan oinarritutako askotariko sailkapen-sistemak

Azpiatal honetan, zuhaitz moduko egituretan oinarritzen diren algoritmoak aztertuko dira.

#### **Bagging (Bag)**

Bagging, *Bootstrap Aggregating*-en akronimoa, Leo Breimanek proposatutako Ikaskuntza Automatikoko algoritmo bat da [100]. Bagging-aren ideia sailkapen-eredu ahulak modu independentean entrenatzea da, eta, ondoren, emaitzak konbinatzea, eredu prediktiboen zehaztasuna eta egonkortasuna hobetzeko. Sailkapen arazoetan, algoritmo bakoitzaren gehiengoaren aldeko botoa erabiltzen da (moda); erregresio arazoetan, berriz, iragarpenen batezbestekoa kalkulatu da. Bagging-a Bootstrapping kontzeptuan datza, ordezkapena duten datuen azpimultzoak lortzean eta eredu ahul bakoitza azpimultzo horietako batekin entrenatzean oinarritzen dena. Bagging-aren helburu nagusia eredu indibidualen bariantza murriztea da haien emaitzen batezbestekoa egitean, eta horrek, askotan, ereduaren zehaztasun orokorra hobetzea dakar. Bagging-en eredu independenteak eta dibertsifikatuak konbinatzeak gaindoikuntzarako probabilitatea murrizten du eta Ikaskuntza Automatikoko hainbat aplikaziotan errendimendu prediktiboa hobetzeko teknika eraginkorra izatea eragiten du. [101]-tik aldatutako 4.3. Irudian Bagging algoritmoaren funtzionamendua erakusten da. Bertan ikus daiteke algoritmo bakoitza datuen banaketa desberdin batekin entrenatzen dela *bootstrapping* metodoaren arabera.

Laburbilduz, Bagging-a teknika erabilgarria da bariantza handiko modeloen-tzat. Hainbat eredu independente eta dibertsifikatu konbinatzean, Bagging-ak gaindoikuntza-arriskua murrizten du eta errendimendu prediktiboa hobetzen du eredu bakar batekin alderatuta. Gainera, paralelizazio-prozesuak erraztu egiten du datu-multzo handien ezarpena eta eskalagarritasuna. Bagging-a Ikaskuntza Automatikoko algoritmo batzuekin batera erabiltzen da, eta teknika hedatua eta eraginkorra da Ikaskuntza Automatikoaren arloan.



4.3. Irudia: Baggingen algoritmoaren egituraren adibidea.

### AdaBoost (AdaB)

AdaBoost-a *Adaptive Boosting* izenez ere ezaguna, Yoav Freundek eta Robert Schapirek proposatutako Gainbegiraturako Ikaskuntza Automatikoko algoritmo bat da [102]. Bere helburu nagusia sailkatzaile ahulen zehaztasuna hobetzea eta sailkatzaile indartsu bihurtzea da, sailkatzaile ahul batzuk sekuentzialki konbinatuz. Sailkatzaile ahul bakoitza aurreko sailkatzaileak egindako akatsak zuzentzeko egokitzen da, eta, horrela, sailkatzaile-sekuentzia bat sortzen da, elkarlanean ari dena, azken sailkatzaile zehatzago eta sendoago bat agerrarazteko.

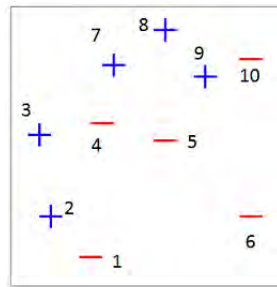
AdaBoostaren entrenamendu prozesuan, sailkatzaile ahul batekin eta entrenamendu datu multzo batekin hasten da. Iterazio bakoitzean, AdaBoostak sailkatzaile ahula egokitzen du, aurretik gaizki sailkatutako instantziei garrantzi handiagoa emanez. Hori entrenamendu-instantziei pisuak esleituz lortzen da. Gainera, sailkatzaile ahularen errore haztatua kalkulatu da, eta pisu bat esleitzen zaio zehaztasunaren arabera. Zehaztasun handiko sailkatzaile ahulek pisu handiagoa hartzen dute. Ondoren, AdaBoostak sailkatzaile ahulak konbinatzen ditu haztatutako bozketa bidez sailkatzaile indartsu bat osatzeko. Prozesu iteratibo horrek azken sailkatzailearen zehaztasuna hobetzen du, sailkatzen zailenak diren kasuetara bideratzen baita.

Hitz errazetan, AdaBoost-a Ikaskuntza Automatikoko algoritmo bat da, sailkatzaile baten zehaztasuna hobetzen duena, sekuentzia batean zenbait sailkatzaile ahulago konbinatuz. Prozesuan, lehen sailkatzaile bat entrenatzen da eta gaizki sailkatu ziren kasuak identifikatzeko erabiltzen da. Ondoren, aurreko

### 4.3. GAINBEGIRATUTAKO IKASKUNTZAKO ALGORITMOAK

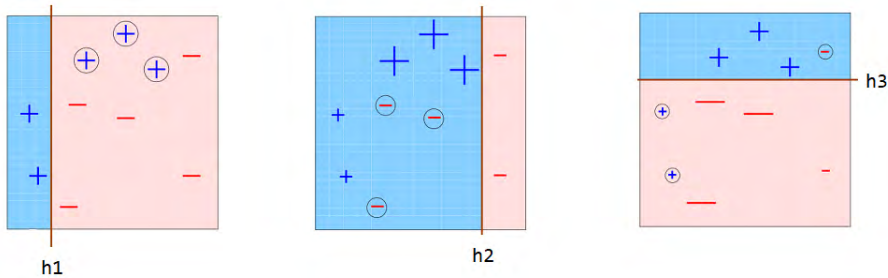
sailkatzailearen akatsak zuzentzera bideratutako sailkatzaile berri bat eraikitzen da. Ziklo hori hainbat aldiz errepikatzen da, eta iterazio bakoitzean, pisu bat esleitzen zaio sailkatzaile bakoitzari, bere etekinean oinarrituta. Azkenik, sailkatzaileak konbinatzen dira banakako sailkatzaileak baino sailkatzaile ahaltzua-goa eta zehatzagoa osatzeko.

Algoritmo honen funtzionamendua argiago ikusteko, 4.4. Irudiak [103]-tik ateratako adibide praktiko bat erakusten du. Bertan, AdaBoost datu-multzo bati aplikatzeko modua ilustratzen da, bi klasetan sailkatzeko helburuarekin: -1 eta +1.



4.4. Irudia: Jatorrizko datuak.

4.5. Irudian 3 sailkatzaile erraz agertzen dira ( $h1$ ,  $h2$  eta  $h3$ ), modu sekuentzian sortuak.  $h1$  behatzen, zirkuluetan itxitako +ak gaizki sailkatzen dituela nabaritzen da; horregatik, hurrengo iterazioan gaizki sailkatutako behaketa horiek garrantzi edo pisu handiagoa izango dute  $h2$  sailkatzaile berrian (bigarren irudian agertzen diren +ak).  $h2$  sailkatzailea begiratzean, ikusten da ondo sailkatzen dituela + handi horiek. Hala ere, gaizki sailkatzen ditu zirkuluetan itxita dauden -ak, eta, beraz,  $h2$ rekin egin zuen bezala,  $h3$ rako, gaizki sailkatutako - behaketa horiek lortuko dute pisu esanguratsuen (hirugarren irudian handienak diren -). Horrela,  $h3$  sailkatzaileak hobeto sailkatzen ditu - horiek.



4.5. Irudia: AdaBoostaren prozedurari jarraiki entrenatutako  $h1$ ,  $h2$  eta  $h3$  sailkatzaileak.

#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

---

( $H_{final}$ ) azken sailkatzailea sailkatzaile sinpleen ( $h1$ ,  $h2$  eta  $h3$ ) haztapen gisa eraikitzen da, 4.6. Irudian erakusten den bezala.

$$H_{final} = \text{sign} \left( \alpha_1 \begin{array}{|c|} \hline \text{blue} \\ \hline \text{red} \\ \hline \end{array} + \alpha_2 \begin{array}{|c|} \hline \text{blue} \\ \hline \text{red} \\ \hline \end{array} + \alpha_3 \begin{array}{|c|} \hline \text{blue} \\ \hline \text{red} \\ \hline \end{array} \right) = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \text{blue} & \text{blue} & \text{red} \\ \hline \text{blue} & \text{red} & \text{red} \\ \hline \text{blue} & \text{red} & \text{red} \\ \hline \end{array}$$

**4.6. Irudia:** Azken sailkatzailea lortzea. ( $\alpha_t$ ) balioak [103]-ren metodoaren azalpen xehatuan agertzen diren haztapenak dira.

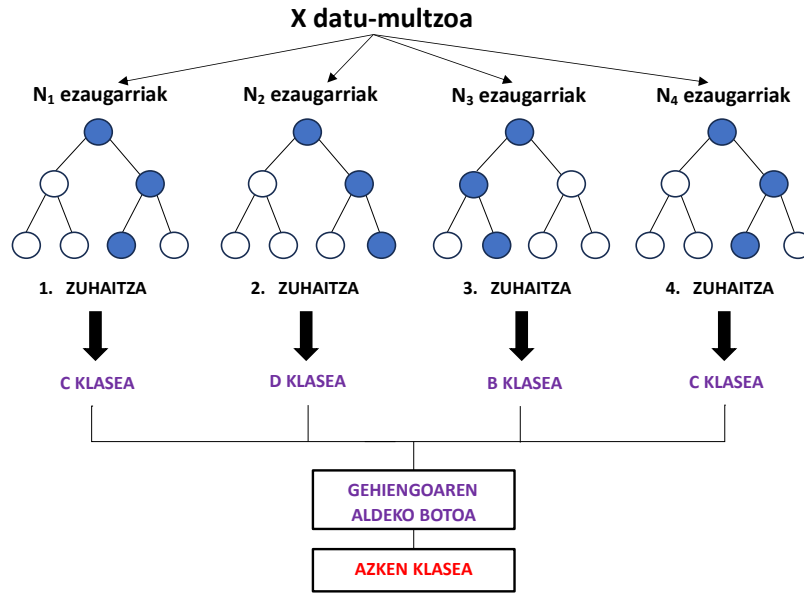
Aurreko adibidean ikus daitekeen bezala, AdaBoost metodoaren abantaila nagusietako bat sailkatzaile ahulen errendimendua hobetzea eta eredu zehatzagoa eta orokorragoa sortzea da. Hala ere, bere mugen artean gaindoikuntzarako duen joera nabarmentzen da, entrenamendu-multzoak zarata edo balio atipikoak dituenean ager daitekeena. Eraginkorra izan arren, AdaBoost-a beste ikaskuntza-algoritmo batzuk baino motelagoa izan daiteke, prozesu iteratiboa eta instantzien haztapena direla eta. Gogoeta horiek gorabehera, AdaBoost-a asko erabiltzen da sailkapen-arazoetan, eta mundu errealeko hainbat aplikaziotan eraginkorra dela erakutsi du.

#### Random Forest (RF)

Random Forest algoritmoa, Leo Breimanek eta Adele Cutlerrek proposatua [104], Gainbegiratutako Ikaskuntza Automatikoko teknika bat da, sailkapen-zereginetarako zein erregresio-zereginetarako erabiltzen dena. Bagging-a eta Boosting-a bezala, *ensemble learning* (baterako ikaskuntza) ideian oinarritzen da, non eredu asko konbinatzen diren algoritmoaren errendimendu orokorra hobetzeko. Funtsean, metodo honek hainbat erabaki-zuhaitz sortzen ditu entrenamendu-datuen multzo batetik abiatuta, eta emaitzak konbinatzen ditu zuhaitz bakoitzaren banakako emaitzekin alderatuta eredu bakarra eta sendoagoa sortzeko. RF algoritmoa bereizten eta ezaugarritzen duena da konbinazio hori datuen eta ezaugarrien ausazko laginketa-tekniken bidez lortzen dela, eta horrek algoritmoari zaratarekiko erresistentzia eta dimentsionalitate handiko datu-multzo handiak maneiatzeko gaitasuna ematen dio. Azken batean, RF algoritmoak Ikaskuntza Automatikoko ataza askotan eraginkorra dela erakutsi du, bereziki zehaztasun eta erresistentzia oneko ereduak bilatzen direnean.

4.7. Irudian, [105]-tik ateratakoan, RF algoritmoaren funtzionamendua osatzen duten lau etapak bistaratzen dira. Etapa hauek dira: basoaren sorrera, zuhaitzen entrenamendua, ezaugarrien hautaketa eta iragarpena.





4.7. Irudia: Random Forest algoritmoaren funtzionamendua.

Hasteko, RFak hainbat erabaki-zuhaitz sortzen ditu modu independentean. Basoko zuhaitz kopurua aurretik doitu daitekeen parametro bat da. Zuhaitz horietako bakoitza entrenamendu-datuen ausazko lagin bat eta ezaugarrien (atributuak) ausazko azpimultzo bat erabiliz eraikitzen da. Ausazko laginketa-estrategia honek zuhaitz bakoitzaren aniztasuna bermatzen du, eta horrek algoritmoaren eraginkortasunari eta sendotasunari laguntzen dio.

Hurrengo etapan, zuhaitz bakoitza Bagging prozesuaren bidez entrenatzen da. Horrek esan nahi du zuhaitz bakoitza jatorrizko entrenamendu multzotik hartutako ausazko lagin batekin entrenatzen dela, adibide batzuk errepikatzeko eta beste batzuk baztertzeko aukerarekin. Ordezitutako ausazko laginketaren teknika honek aldakortasuna dakar zuhaitzen entrenamenduan, haien arteko korrelazio handia saihestuz eta algoritmoa orokortzeko gaitasuna hobetuz.

Ondoren, hirugarren etapan, algoritmoak ezaugarrien ausazko laginketa egiten du. Basoko zuhaitz bakoitzaren nodo bakoitzean, ezaugarrien ausazko azpimultzo bat hautatzen da, puntu horretan zatiketarik onena zehazteko. Ezaugarriak ausaz hautatzeko estrategia hori funtsezkoa da zuhaitzen arteko korrelazioa murrizteko eta eredia orokortzeko gaitasuna hobetzeko. Zuhaitz bakoitzean hainbat ezaugarri-azpimultzo erabiltzean, baso anitzagoa eta sendoagoa lortzen da, eta horrek gaindoikuntza prebenitzen eta datu berrietan iragarpenen zehaztasuna handitzen laguntzen du.

Azkenik, basoko zuhaitz guztiak eraiki ondoren, baso osoa erabiltzen da iragarpenak egiteko. Sailkapen atazetan, zuhaitz bakoitzak iragarpen bat igortzen du, eta RFren azken iragarpena gehiengoaren bozketaren bidez zehazten da, zuhaitz guztien erantzunak kontuan hartuta. Bestalde, erregresio atazetan,

## 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

---

zuhaitz guztien iragarpenen batezbestekoa egiten da azken emaitza lortzeko. Zuhaitz independenteetatik datozen iragarpen anitzen konbinazio honek RF algoritmoaren zehaztasuna eta egonkortasuna indartzen ditu Ikaskuntza Automatiko hainbat aplikaziotan.

RF algoritmoak modeloaren entrenamenduan erabilitako ezaugarrien garrantziari buruzko informazio garrantzitsua ematen du. Garrantzizko neurri hori ezaugarri bakoitza sartzeak ereduaren zehaztasuna hobetzen laguntzen duen zenbatekoan oinarritzen da. Funtzionalitate horri esker, hobeto uler daiteke ezaugarriek nola eragiten duten ereduaren aurreikuspenetan, eta errazagoa da lortutako emaitzak interpretatzea.

RFak hainbat abantaila esanguratsu eskaintzen ditu. Lehenik eta behin, entrenatzeko erraztasunagatik nabarmentzen da, errazagoa baita teknika konplexuekin alderatuta, baina antzeko errendimenduari eutsiz. Gainera, zehaztasuna mantentzeko gai da, baita datu galduen proportzio esanguratsuekin ere, eta datu-base handietan errendimendu handia erakusten du. Iragarle bat baino gehiago erabiltzeko gaitasuna, bat bera ere baztertu gabe, eta iragarle horien garrantzia balioesteko trebetasuna direla medio, dimentsionaltasuna murrizteko tresna baliotsua da. Datu zaratatsuen eta balio atipikoen aurrean duen sendotasunagatik ere nabarmentzen da, datuak normalizatzeko beharrik gabe eta erabakitzeke zuhaitz bakar batekin alderatuta gaingoikuntzarako joera txikiagoarekin. Gainera, ezaugarrien garrantziaren neurketa bat ematen du, atributuen hautaketa erraztuz.

Bestalde, RFak ere baditu zenbait desabantaila. Bere eragozpen nagusia konputazioan datza, baliabideei dagokienez garestia izan daitekeelako eredu sinpleagoekin alderatuta. Gaingoitzeko joera txikiagoa duen arren, zuhaitzen artean nolabaiteko korrelazioa egon daiteke zuhaitz kopurua txikia bada. Bestalde, emaitzak grafikoki ikusteak interpretatzeko zailtasunak ekar ditzake, basoaren konplexutasuna dela eta. Gainera, bere iragarpenak ez dira jarraituak eta ereduaren entrenamenduan erabilitako datu-multzoaren balio-tartera mugatuta daude. Maila desberdinetako iragarle kategorikoak dituzten egoeretan, emaitzak maila altuenetara lerratu daitezke.

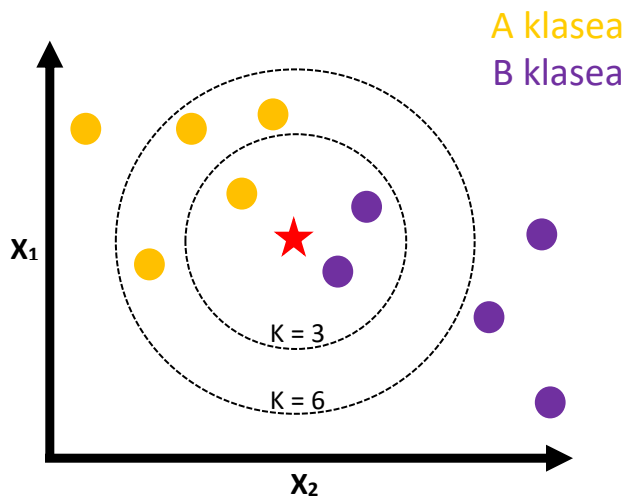
### 4.3.4. k Nearest Neighbours (k-NN)

k-Nearest Neighbors algoritmoa (k-NN) Ikaskuntza Automatiko metodo ezagun bat da, sailkatzeko eta erregresiorako erabiltzen dena. Instantzietan oinarritutako ikuspegia da, eta horrek esan nahi du ez duela eredu esplizitu bat ikasten entrenamenduan zehar. Horren ordez, entrenamendu-datuen zati bat gordetzen du, erreferentzia-patroien multzoa (CPR) izenekoa, eta instantzien arteko antzekotasuna erabiltzen du iragarpenak egiteko. Kalitatezko CPR bat sortzeko, edizio-teknikak inplementatzen dira, erreferentzia-patroien multzoaren kalitatean eragina izan dezaketen datu ez-sendoak edo okerrak ezabatzea barne. Halaber, datuek formatu uniforme izatea eta eskala berean egotea ziurtatzen da, konparazioa eta analisisa errazteko. Gainera, kondentsazio-teknikak aplikatzen dira datuen konplexutasuna sinplifikatzeko, funtsezko informazioa galdu gabe, eta jatorrizko datu-multzoaren lagin adierazgarri bat aukeratzeko;

horrela, datuen tamaina murrizten da, patroien aniztasuna sakrifikatu gabe.

Instantzia berri baten zein erreferentzia-multzoren antz handiena duen zehazterakoan, k-NN algoritmoak instantzia berri horrek aldez aurretik sailkatutako instantziekiko duen hurbiltasuna kalkulatu du, distantzia-neurriak erabiliz, hala nola distantzia euklidearra. Gero, bozketa-prozesu bat hasten da, eta instantzia berria klaseko kide gisa sailkatzen da, hurbileko instantzia gehien dituen. Horretarako, k parametroa erabiltzen da, eta parametro horrek zehazten du gertuen dauden instantzietatik zenbat hartuko diren kontuan bozketan, ez baitira instantzia guztiak kontuan hartzen, baizik eta hurbilen daudenak bakarrik. Funtsezkoa da k-rako balio egokia aukeratzea, horrek eragin nabarmena izan baitezake sailkapenaren emaitzan. k txikia bada, eredu zaratarekiko eta ezohiko balioekiko sentikorra izan daiteke; aldiz, balio handi batek eredu konplexuetara egokitze gaitasuna murriztu dezake.

4.8. Irudian, [106]-tik aterata, algoritmo hori erabiliz egindako sailkapenaren adibide bat ikusten da. Bertan, emaitzen arteko aldea ikusten da, aukeratu den k balioaren arabera. Diagraman bi klase bereiz daitezke, A klasea eta B klasea. Helburua da puntu berri bat sartzean bi klaseetako batean sailkatzea. Datu berri bat sartzen denean (izar batek irudikatua), k-NN algoritmoak bere sailkapen-prozedura erabiltzen du datu berri horri klase bat esleitzeko. k balioa 3 denean, izarraren inguruan zirkunferentzia bat sortzen da, izarretik hurbilen dauden 3 puntuak hartzen dituena. Zirkunferentzia honen barruan, B klaseko 2 puntu eta A klaseko puntu 1 daude. Kasu honetan, k-NNk izarra B klasean sailkatuko du, klase horretako puntu gehiago baitaude bere 3 ondoko hurbilen artean. Hala ere, k balioa 6ra aldatuz gero, egoera aldatu egiten da. Orain, izarraren 6 ondoko hurbilen artean, 4 A klasekoak dira eta 2 bakarrik B klasekoak. Beraz, k-NNk izarra A klasean sailkatuko du.



4.8. Irudia: k-NN metodoa erabiliz sailkatze prozedura.

## 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

---

Laburbilduz,  $k$ -NN ikuspegi erabilgarria eta erraza da, instantzien arteko hurbiltasuna erabiltzen du iragarpenak egiteko, baina  $k$  egokina aukeratzea funtsezko alderdia da sailkapen-zereginetan emaitza zehatzak lortzeko.

$k$ -NN algoritmoak abantaila esanguratsuak eskaintzen ditu bere sinpletasunari, inplementatzeko erraztasunari eta datuetako harreman konplexuetarako moldagarritasunari dagokienez. Hala eta guztiz ere, garrantzitsua da zenbait muga kontuan hartzea, hala nola kostu konputazional handia sailkapenean zehar, bereziki entrenamendu talde handientzat edo denbora errealeko iragarpenentzat. Kasu horietan, eskaeren arteko distantziak kalkulatzeko garestia izan daiteke. Gainera, funtsezkoa da datuen aurreprozesamendu egokia egitea, alborapenak saihesteko eta ereduaren osotasuna bermatzeko, ezaugarrien normalizazioa barne, eskala bera izan dezaten, eta falta diren balioak erabil daitezten.

### 4.3.5. Naïve Bayes (NB)

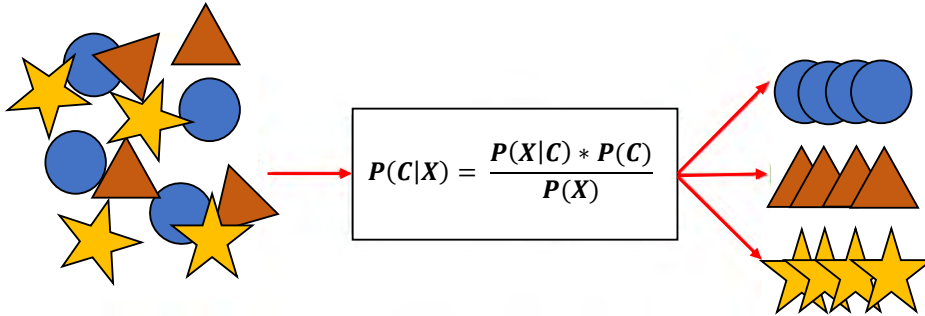
Naïve Bayes (NB) Ikaskuntza Automatikoko algoritmo bat da, datuen sailkapenean eta testu-meatzaritzan oso erabilia, ezaugarrien arteko baldintzapeko independentzia bere gain hartzen duena, eta horrek aplikazio konkretu batzuetan azkar eta eraginkor bihurtzen du.

NB algoritmoa Bayesen teoreman oinarritzen da, bi gertakariren baldintzako probabilitateen arteko erlazioa ezartzen duena. Demagun ezaugarri multzo bat  $X$  (atributuak) eta  $C$  klaseko etiketa bat ditugula. 4.1 ekuazioan Bayesen teorema emandako adierazpena agertzen da.

$$P(C|X) = \frac{P(X|C) * P(C)}{P(X)} \quad (4.1)$$

4.1 ekuazioan,  $P(C|X)$ -k instantzia  $C$  klasekoa izateko probabilitatea adierazten du,  $X$  ezaugarrien balioa kontuan hartuta (a posteriori probabilitatea).  $P(X|C)$   $X$  ezaugarriak gertatzeko probabilitatea da, instantzia  $C$  klasekoa delako. Azkenik,  $P(C)$   $C$  klasearen aurretiko probabilitatea da (a priori probabilitatea) eta  $P(X)$   $X$  ezaugarrien probabilitatea da. Lehen esan bezala, algoritmo hori baldintzapeko independentzian oinarritzen da (hortik dator Naïve terminoa), eta horrek esan nahi du  $X$  ezaugarri guztiak independentetzat jotzen direla,  $C$  klasearen balioa kontuan hartuta. Horrek ezaugarri bat egoteak edo ez egoteak ez duela eraginik beste ezaugarri batzuen presentzian edo absentsian esan nahi du.

[107]-tik aldatutako 4.9. Irudian ikus daitekeenez, algoritmo honekin sailkatzeko prozesuan, lehenik eta behin etiketatutako instantziak dituen entrenamendu-multzo bat behar da. Algoritmoak klase bakoitzerako ezaugarrien probabilitateak eta klase bakoitzaren aurretiko probabilitatea kalkulatu ditu. Ondoren, etiketatu gabeko instantzia berri bat aurkezten denean, algoritmoak Bayesen teorema eta baldintzapeko independentzia-ustea erabiliz klase bakoitzarena izateko probabilitatea estimatzen du. Azkenik, probabilitate handiena duen klasearen etiketa esleitzen da, hala nola iragarpena.



4.9. Irudia: Sailkapen prozesua Naïve Bayes algoritmoaren bidez.

Naïve Bayes-en hiru aldaera daude, bakoitza ezaugarri eta aplikazio espezifikoekin. Lehenengoa NB Gaussianoa da, ezaugarriek banaketa normala dutela onartzen denean erabiltzen dena. Mota hau erabilgarria da datuak kanpai edo gaussiano banaketa bati egokitzen zaizkionean. Bigarrenik, NB Multinomial aldaera dago, ezaugarri diskretu edo kategorikoetarako egokia. Bereziki erabiltzen da testua sailkatzeko arazoetan, hala nola sentimenduaren analisisian (testu baten polaritate emozionala zehaztea, hau da, testuak sentimendu positiboak, negatiboak edo neutroak adierazten dituen zehaztea) edo dokumentuen sailkapenean (dokumentu bati kategoria bat esleitzea edukian oinarrituta), non hitzburutazioak (hitz konkretu batzuk agertzen diren maiztasunez) kontatzen diren. Azkenik, hirugarren mota NB Bernoulli da, eta bertan onartzen da ezaugarriak bitarrak direla, hau da, benetako edo gezurrezko balioak dituztela. Testua sailkatzeko arazoetan ere erabiltzen da, eta egokia da hitzen presentzia edo gabezia bakarrik kontuan hartzen denean.

Aldaera bakoitzak bere abantailak eta aplikazio espezifikoak ditu, eta horrek aukera ematen du Ikaskuntza Automatikoan eta datuen sailkapenean hainbat egoerara egokitzeko. Hala ere, garrantzitsua da kontuan hartzea baldintzapeko independentzia kasu batzuetan ez dela baliozkoa eta eragina izan dezakeela algoritmoaren zehaztasunean. Hala eta guztiz ere, Naïve Bayes aukera hedatua da oraindik ere, hainbat aplikaziotan duen sinpletasuna eta errendimendu ona dela eta.

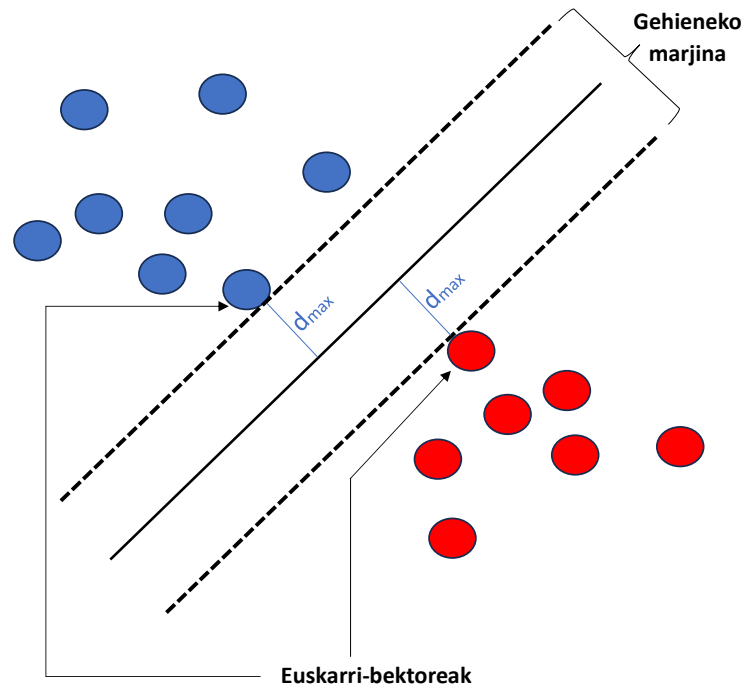
#### 4.3.6. Support Vector Machines (SVM)

Euskarri-Bektorialeko Makinen algoritmoak, SVM izenez ezagutzen denak ingelesezko siglengatik (Support Vector Machines), ospe handia lortu du, datu-multzo konplexuetan sailkapen zehatzak egiteko duen gaitasunagatik. Askok erabiltzen da sailkapen- eta erregresio-zereginetan Gainbegiratutako Ikaskuntzaren eremuan.

#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

SVMren helburu nagusia klaseen arteko ahalik eta bereizketarik onena bilatzea da, klase desberdinen arteko datuak hobeto bereizten dituen hiperplano optimoa aurkituz. Hiperplano hau azalera laua baino ez da,  $(n-1)$  dimentsiokoa, non  $n$ -k datuen ezaugarri edo atributuen kantitatea adierazten duen. Horrela, hiperplanoak klase ezberdinen arteko muga gisa jokatzen du. Hiperplanoaz gain, algoritmo honetarako funtsezko bigarren kontzeptu bat dago: euskarri-bektoreak. Hiperplanoak ezarritako mugatik gertuen dauden eta muga horren kokapenean eta orientazioan eragina duten puntuak dira.

Algoritmoak klaseen arteko tartea maximizatu nahi du, hau da, hiperplanoaren eta euskarri-bektoreen arteko distantzia perpendikularra. Klaseak bereiziko dituen lerro optimo bat aurkitu beharrean, SVMk hiperplano bat aurkitzen du, bereizketa-marjina maximizatzen duena, eta horrek datu berrietan orokortzeko gaitasun hobea ematen du. [108]-tik aldatutako 4.10. Irudiak bi klasetako distantzien arteko gehieneko tartea lortuko lukeen hiperplanoaren adibide bat erakusten du.



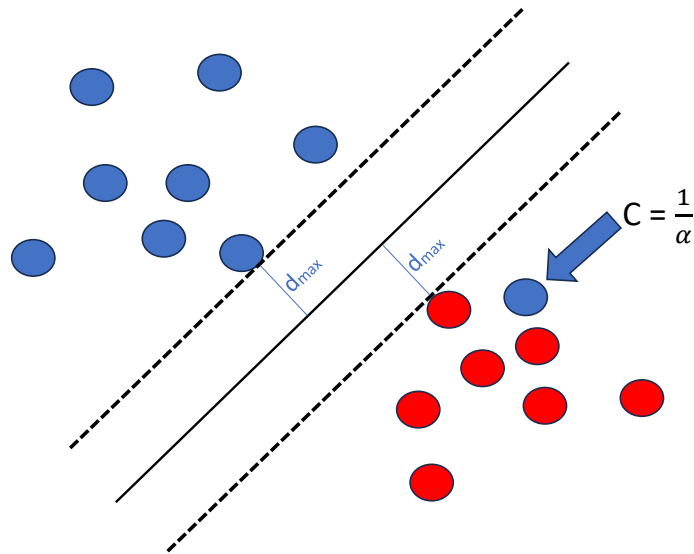
4.10. Irudia: Sailkapen optimoa euskarri-bektoreen makinekin.

Kasu askotan, SVM algoritmoa entrenatzeko erabiltzen diren datuek zarrata izan dezakete edo modu inperfektuan etiketatuta egon daitezke. Gainera, batzuetan, datu puntu batzuk zaila da behar bezala sailkatzea, arazoa konplexuegia delako. Hala ere, kasu gehienetan, Ikaskuntza Automatikoaren ereduak ondo orokortzea bilatzen da, nahiz eta entrenamendu multzoan puntu gutxi batzuk era bikainean sailkatuta ez egon.

### 4.3. GAINBEGIRATUTAKO IKASKUNTZAKO ALGORITMOAK

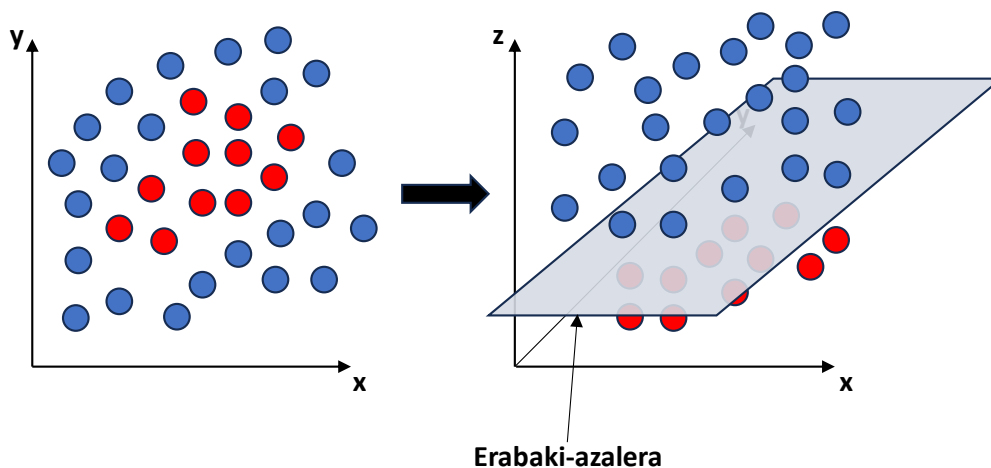
Egoera horiei aurre egiteko, SVMk konponbide bat eskaintzen du  $C$  izeneko hiperparametro bat erabiliz. Hiperparametro hau *alfa*-ren alderantzizkoaren antzekoa da Ridge, Lasso eta ElasticNet erregularizazioetan [109].  $C$  hiperparametroaren bidez, ereduari aplikatzen zaion erregularizazio-kantitatea kontrola dezakegu. Beste era batera esanda,  $C$ -k zehazten du nola den zorrotza edo malgua SVMa, sailkapen-prozesuan puntu batzuk ezin hobeto doitzea ahalbidetzen baitu.

[108]-tik aldatutako 4.11. Irudiak erakusten du nola SVM gai den kasu gehienetan ondo orokortzeko, baita entrenamendu multzoko puntu batzuk behar bezala sailkatuta ez daudenean ere. Horri esker, eredia sendoagoa da eta datu berrietan hobeto lan egiten du.



**4.11. Irudia:** Sailkapen optimoa euskarri-bektoreen makinekin erregularizazio-teknika aplikatuta.

Batzuetan ezinezkoa da bi klase bereiztea ahalbidetzen duen hiperplano bat aurkitzea, linealki bereizgarriak ez diren klaseak bezala ezagutzen dena. Arazo horri aurre egiteko, Kernelaren transformazio-teknika erabiltzen da, hau da, dimentsio berri bat sortzea, klaseak bereizteko hiperplano bat aurkitu ahal izateko. [108]-tik aldatutako 4.12. Irudiak adibide bat ematen du: dimentsio berri hori gehitzean, bi klaseak erraz bereiz daitezke erabaki-azalera baten bidez. Horrela, SVMk hiperplano ezin hobea eraiki dezake espazio berrian, klaseak eraginkortasunez bereizteko. Teknika hau bereziki erabilgarria da datu konplexuekin edo ez-linealekin lan egiten denean, bereizteko aukerak zabaltzen dituelako eta SVM algoritmoaren errendimendua hobetzen duelako.



**4.12. Irudia:** Sailkapen optimoa euskarri-bektoreen makinekin Kernelen transformazio-teknika aplikatuta.

SVM algoritmoa dimentsio handiko espazioetan duen eraginkortasunagatik nabarmentzen da, sailkapen bitarreko eta multiklaseko arazoetan duen errendimendu onagatik eta kernelak erabiliz linealki bereiz ez daitezkeen datuei heltzeko duen gaitasunagatik, eta horrek gaindoikuntza-arriskua murrizten du. Hala ere, desabantailak ditu, hala nola hiperparametroak kontu handiz doitzeko beharra, datu multzo oso handietan izan dezaketen kostu konputazionala eta ezaugarri kopurua lagin kopurua baino askoz handiagoa denean duten muga.

### 4.3.7. Logistic Regression (LR)

Erregresio Logistikoak (edo Logistic Regression ingelesez, LR) bi emaitza posiblerekin modelatzen ditu probabilitateak sailkapen-arazoetan, hau da, nagusiki sailkapen bitarreko zereginetarako erabiltzen den Gainbegiraturako Ikaskuntzako algoritmo bat da. Askok erabiltzen da datu-zientzia, Ikaskuntza Automatikoa eta estatistika bezalako arloetan. Izenak erregresio hitza barne hartzen duen arren, LRA sailkapen-teknika bat da, eta ez erregresio linealaren eredutik eratorriko erregresio-teknika bat.

Erregresio linealaren eredua erregresio-zereginetan eraginkorra izan daiteke, baina arazoak izaten ditu sailkapen-arazoei aplikatzen zaienean. Izan ere, ikuspegi lineala ez da egokia sailkatzeko aukerak sortzeko, eta ez du ahalmenik klaseak zenbakizko balio gisa interpretatzeko (0 eta 1). Gainera, eredu linealak puntuen arteko interpolazioa egiteko joera du, eta horrek zaildu egiten du emaitzak probabilitate gisa interpretatzea.

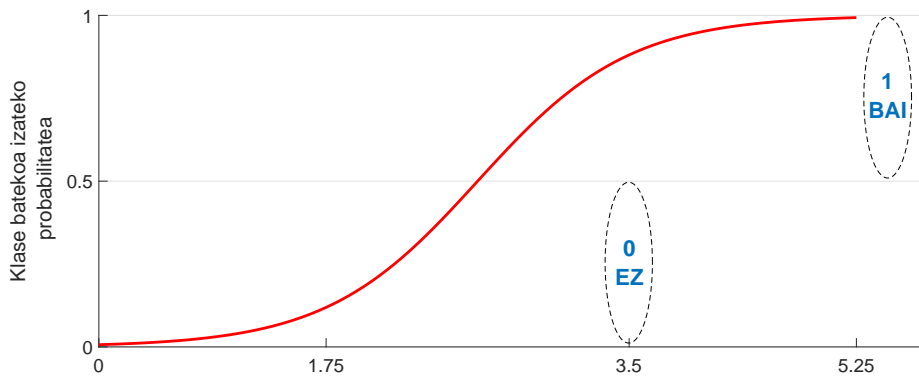
Hala ere, Erregresio Logistikoak sailkapenerako irtenbide bat eskaintzen du funtzio logistikoa erabiliz ekuazio lineal baten irteera 0 eta 1 artean mugatze-



ko. Instantzia bat klase jakin batekoa izateko probabilitatea aurreikustea du helburu. Erregresio linealak irteera jarraituak sortzen ditu, baina LRak probabilitateak sortzen ditu 0tik 1era bitartean. Probabilitate horiek gero klase bitar bihurtzen dira erabaki-atalase baten bidez, 0.5 normalean (probabilitatea 0.5ekoa edo handiagoa bada, klase bat bezala sailkatzen da; bestela, beste klasea bezala sailkatzen da).

[110]-tik ateratako 4.13. Irudian ikus daitekeenez, erregresio linealaren etengabeko irteerak 0tik 1era bitarteko tartean probabilitate bihurtzen dituen funtzioa sigmoide (edo funtzio logistikoa) funtzioa da. Funtzio honek edozein balio erreal hartzen du eta 0 eta 1 arteko balio bati esleitzen dio,  $S$ -ko kurba baten forma hartuz. Funtzio logistikoa 4.2 formula matematikoaren bidez definitzen da, non  $P(y=1)$ -k instantzia klase lekoa izateko probabilitatea adierazten duen, eta  $z$  ezaugarrien eta ereduaren koefizienteen konbinazio lineala da.

$$P(y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (4.2)$$



**4.13. Irudia:** Erregresio Logistikorekin sailkatzea funtzio logistikoren edo sigmoidearen bidez.

LRak abantaila esanguratsua eskaintzen ditu eraginkortasun konputazionalari, inplementatzeko erraztasunari eta interpretatzeko erraztasunari dagokienez, sailkapen-prozesuan ezaugarri bakoitzak duen garrantziaren neurri bat ematen baitu, eta horrek ereduaren azterketa eta ulermena errazten du. Gainera, probabilitateak sortzeko duen gaitasunagatik nabarmentzen da, eta horrek azken sailkapena bakarrik eman dezaketan ereduetatik bereizten du. Adibidez, %99 edo %58 klase bateko kide izateko probabilitatea ezagutzeak alde handia adierazten du erabakiak hartzerakoan.

Hala ere, LRak, linealak direlako, mugak ditu linealak ez diren sailkapen-arazoetan eta horrek datu konplexuekiko moldagarritasuna murriz dezake. Kasu horietan, jada azalduta dauden SVM (ikus 4.3.6.) edo Sare Neuronal Artifizialak (ikus 4.3.8.) bezalako teknika aurreratuagoak kontuan hartzea iradokitzen

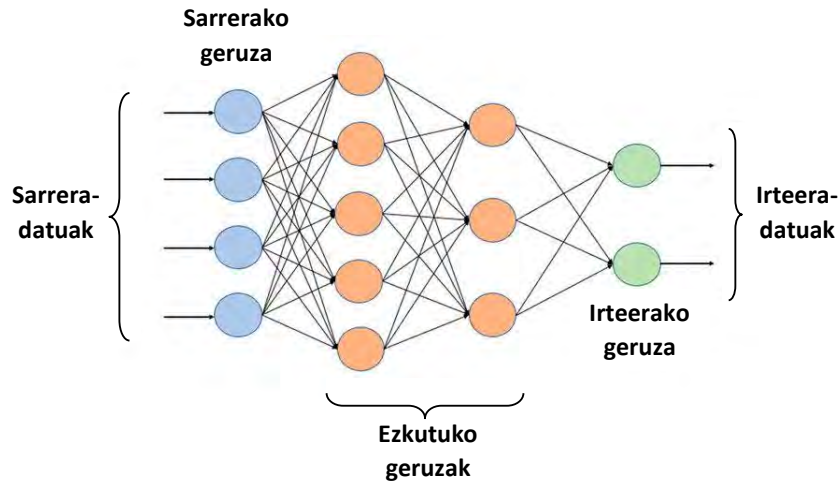


Jarraian, sare neuronal artifizialen hiru adibide aurkezten dira.

**Multilayer Perceptron (MLP)**

Multilayer perceptron (MLP) edo perzeptroi multigeruza SNAren algoritmo zabalenetako bat da Ikaskuntza Sakonaren eremuan. Gainbegiratutako Ikaskuntza-eredu hori sailkapen- zein erregresio-lanetarako erabiltzen da. Giza garunaren informazioaren prozesamendua imitatzekeo ideian oinarrituta, MLPa interkonektatutako nodo edo neuronen geruza ugariz osatuta dago. Geruza bakoitzak aurreko geruzatik jasotzen du informazioa, eta hurrengo geruzara pasatzen du irteera, MLPri ikasteko eta datu berrietara egokitzeko aukera emanez, programazio espliziturik behar izan gabe. Errorearen atzerahedatzea da neuronen arteko konexioen pisuak doitzen dituen funtsezko prozesua, saretik irteteen errorea minimizatzekeo. Horrek MLPri adimen artifizialekeo hainbat aplikaziotan ikasteko gaitasuna eta eraginkortasuna ematen dio.

4.15. Irudian, [113]-tik ateratakeoan, MLP motako SNA baten egitura agertzen da. Jarraian, algoritmo horren funtzionamendua zehatzago deskribatzen da.



4.15. Irudia: MLP sare baten oinarrizko arkitektura.

MLP bat sare-egitura batean antolatutako neurona geruza ugariz osatuta dago. Lehenengo geruzari sarrerako geruza esaten zaio, azken geruzari irteerako geruza, eta tarteko geruzei ezkutuko geruzak esaten zaie. MLParen ezaugarria da gutxienez ezkutuko geruza bat izan behar duela, beharrezkoa izanez gero gehiago izan ahal izatekeo [111].

MLPko neurona bakoitzak sarrera haztatuak jasotzen ditu, batu egiten ditu eta aktibazio ez-linealekeo funtzio bat aplikatzen du irteera bat sortzeko. Geruza

#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

---

ezkutuetako neuronek datuen irudikapen konplexuagoak ikasteko ardura dute; irteera-geruzako neuronek, berriz, ereduaren azken erantzuna ematen dute. Ikaskuntzari dagokionez, MLP-ek entrenamendu-fasean ikasten dute optimizazio-algoritmoak erabiliz, hala nola atzerahedatzea (backpropagation). Prozesu horri esker, sareak neuronen arteko konexioen pisuak doitzen ditu galera-funtzio bat minimizatzeko. Funtzio horrek ereduaren iragarpenen eta entrenamendu-datuen benetako etiketen arteko aldea neurtzen du.

Bestalde, ereduaren ez-linealtasunak sartzeko, neuronetan aktibazio-funtzioak erabiltzen dira. Aktibazio-funtzio komun batzuk ReLU (Rectified Linear Unit) funtzioa dira ezkutuko geruzetarako, eta sigmoide edo softmax funtzioa sailkapen-zereginetako irteera-geruzetarako. Funtzio horiek aukera ematen diote MLPri sarrerako eta irteerako aldagaien arteko erlazio konplexuagoak modelatzeko, eta horrek algoritmo erabilgarri bihurtzen du Ikaskuntza Automatikoko hainbat zereginetarako.

MLPren abantaila nagusien artean, datuen irudikapen konplexuak ikasteko gaitasuna nabarmentzen da, eta horrek bereziki egokia egiten du eredu sofistikatuagoak eta harreman ez-linealak dituzten zereginetarako. Gainera, MLPk malgutasun handia erakusten du sailkapen- eta erregresio-arazoei helduan, eta horrek aukera ematen dio Gainbegiratutako Ikaskuntzako hainbat zereginetara egokitzeko. Beste indargune bat datu-multzo handien eta dimentsionalitate handiko arazoen erabileran duen eraginkortasuna da, eta horrek ezaugarri ugari dituzten aplikazioetarako aukera bideragarri bihurtzen du. Azkenik, hainbat aplikaziotara egokitzeko duen gaitasunak, hala nola irudiak ezagutzeko eta hizkuntza naturala prozesatzeko duen gaitasunak, tresna baliotsua bihurtzen du eremu eta diziplina ugarritan.

Abantailak alde batera utzita, kontuan hartu beharreko desabantaila batzuk ere baditu MLPk. Alde batetik, entrenamendu-datu kopuru handiak eskatzen ditu gehiegizko doikuntza saihesteko, eta hori erronka bat izan daiteke datu-multzo txikiak edo oso desorekatuak dituzten egoeretan. Bestalde, entrenamenduan zehar MLPak gradientearen desagerpena edo eztanda bezalako arazoak izan ditzake, eta horrek ereduaren konbergentzia moteldu edo zaildu dezake. Horrek teknika gehigarriak eska ditzake arazo horiei aurre egiteko, hala nola egokitzeko ikaskuntza-tasen erabilera edo ezaugarrien normalizazioa. Azkenik, arkitekturaren eta MLPren hiperparametroen aukeraketa prozesu desafiatsuak izan daiteke, eta doikuntza eta proba zehatzak behar dira errendimendu handiko eredu optimoa lortzeko. Hala ere, desabantaila horiek gorabehera, MLPa Ikaskuntza Automatikoaren eremuan asko erabiltzen den tresna da.

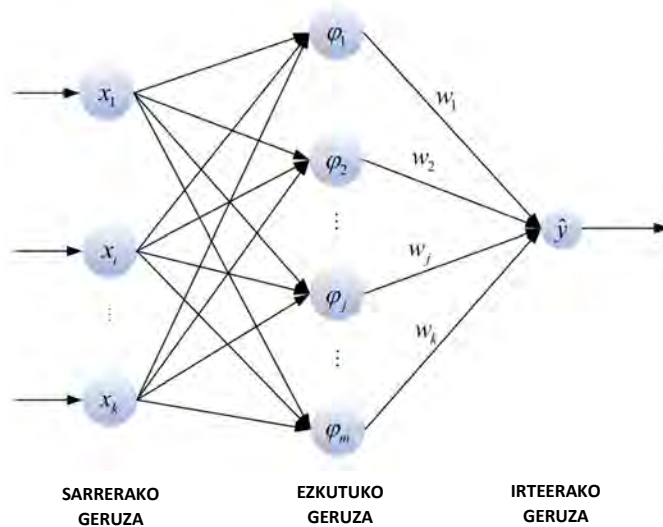
#### **Radial-Basis Network (RBF)**

Oinarri Erradialeko Sarea (RBF) SNA kasu berezi bat da, eta egitura eta aktibazio-funtzio zehatz bat ditu. Gainbegiratutako Ikaskuntzan erabiltzen da, funtzioen hurbilketan eta sailkapenean zentratuta. Azpiatal honen hasieran azaltzen den bezala, ohiko SNAek hiru geruza mota dituzte: sarrerako geruza, ezkutuko geruza eta irteerako geruza. RBFa beste SNA batzuetatik bereizten da,

### 4.3. GAINBEGIRATUTAKO IKASKUNTZAKO ALGORITMOAK

geruza ezku bakarra izan dezakeelako [114], eta, gainera, aktibazio-funtzio espezifikoak izan behar ditu, MLPak ez bezala ezkutuko geruza bat edo gehiago izan baititzake [111].

Jarraian, [115]-tik ateratako 4.16. Irudian erakusten den bezala, RBF algoritmoaren funtzionamendua deskribatzen da, hiru geruzetako bakoitzaren rol espezifikoen bidez [116]. Lehen etapan, sarrerako geruza dago, entrenamendu-eta proba-ereduak edo -adibideak jasotzeko ardura duena. Hau da, geruza horretako neuronek datu-multzoaren sarrera-ezaugarrien balioak jasotzen dituzte. Zentzu horretan, neurona bakoitzak ezaugarri bat adierazten du eta bere funtzioa datuak hurrengo geruzara igortzea da.



**4.16. Irudia:** RBF algoritmoaren bidezko sailkapen-prozesuaren egitura. Algoritmo honek geruza ezku bakar batekin lan egiten du.

Bigarren etapa geruza ezkutua da, eta bere nodo bakoitza sarrerako geruzako nodo guztietara erabat konektatuta dagoelako bereizten da. Geruza ezkutua RBF sareen bereizgarri nagusia da, baita izenaren jatorria ere. Geruza horretan, neurona bakoitza oinarri erradialeko funtzio baten bidez irudikatzen da (normalean funtzio gaussiar bat). Funtzio horrek irteera-balioa sortzen du, sarrerako balioaren eta zentro jakin baten arteko distantzia euklidearrean oinarrituta. Geruza ezkutuko neuronen zentro horiek, oro har, entrenamenduko datu-puntuetatik abiatuta hautatzen dira eta hori taldekatze-algoritmoak erabiliz egiten da, hala nola k-means [117]. Gainera, entrenamenduan, oinarri erradialeko funtzioen zabalerak ere doitzen dira, ereduaren errendimendua optimizatu nahian.

Azkenik, hirugarren etapa irteera-geruza da, eta haren egitura aldatu egin daiteke, jorratzen ari den arazoaren arabera. Erregresio-lanetan, irteera-geruza irteera jarraitua eragiten duen neurona bakar batek osa dezake. Aldiz, sailkapen-

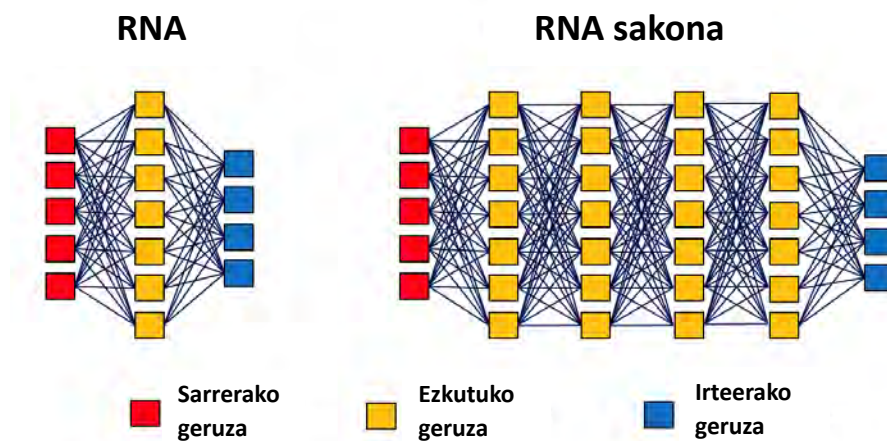
#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

lanetan, irteera-geruzak neurona ugari izan ditzake, non bakoitzak klase ezberdin bat irudikatzen duen eta irteera-baliorik altuena duen neurona ereduak aurreikusitako klasetzat jotzen den.

RBF sareek hainbat abantaila eskaintzen dituzte, hala nola erregresio- eta sailkapen-arazoetan funtzio konplexuak hurbiltzeko gaitasuna, eta hiperparametroekiko sentsibilitate txikiagoa, entrenamendua errazten duena. Hala ere, desabantaila bat zentroen kopurua eta kokapena geruza ezkutuan behar bezala zehazteko zailtasuna da, eta horrek eragina izan dezake ereduaren errendimenduan. Gainera, sare horiek konputazionalki garestiagoak izan daitezke sareko beste arkitektura batzuekin alderatuta.

#### Ikaskuntza Sakona (Deep Learning)

Deep Learning sare neuronalen azpimultzo bat da eta haren bereizgarria hainbat funtzionalitate dituzten geruza ezkutukoak sartzea da, [118]-tik ateratako 4.17. Irudian ikus daitekeen bezala. Gainerako SNAk bezala, giza garunaren funtzionamenduan oinarritutako printzipioetan oinarritzen da. Datuen interpretazio gero eta konplexuagoak eskaintzen dituzten geruza ugari ditu. Sakontasuna handitu ahala, Deep Learningak aukera ematen dio sistemari datuen errepresentazio oso landuak ikasteko; izan ere, geruza bakoitzak datu multzoaren ezaugarri konplexuagoak eta abstraktuagoak ateratzen ditu, eta horrek eredu gero eta zeregin aurreratuagoi ekiteko gaitzen du. Ikuspegi hori hainbat diziplinatan aplikatzen da, ahotsa ezagutzea, hizkuntza naturala prozesatzea, objektuak detektatzea eta irudiak identifikatzea barne.



4.17. Irudia: Sare neuronal artifizial tradizional eta sakon baten adibidea, azken honek geruza ezkutuko ugari dituelarik.

## 4.4. Ereduen ebaluazioa eta baliozkotzea

Entrenamendua eta baliozkotzea funtsezko prozesuak dira sailkatzaile baten errendimenduaren ulermen objektiboa lortzeko. Ildo horretan, garrantzitsua da azpimarratzea eredu ez dela inoiz baliozkotu behar entrenatzeko erabili ziren datu berberak erabiliz, horrek errendimenduaren ebaluazio partziala eta zehaztugabea ekar baitezake.

Datuak zatitzeko oinarritzko modu bat multzoa bi bloketan banatzea da; batak, ereduaren entrenatzeko eta baliozkotzeko entrenamendu-datuaren multzoa izango litzateke, eta bestea, proba-multzoa [119].

Esan bezala, entrenamendu-multzoa bi helburu ezberdinetarako erabiltzen da. Horregatik, ohikoa da talde hori bi zati txikiagoetan banatzea: entrenamenduarena eta baliozkotzearena. Eredua entrenamendu-datueta egokitzen denez, adibideetatik ikasiz eta etorkizunean iragarpenak egiteko ereduak bilatuz, normalena entrenamendu-datuaren multzoa baliozkotzearena baino handiagoa izatea izaten da. Bestalde, baliozkotze-multzoak funtsezko zeregina du parametroak doitzeko eta datuak aztertzeke prozesuan ezaugarriak hautatzeko.

Azkenik, sailkatzailearen jarduna ebaluatzeko, proba-datuaren multzoa erabiltzen da. Aldez aurretik erabili gabeko datuak dira. Multzo horrek algoritmoen errore- eta arrakasta-tasak zehazten ditu, eta aukera ematen du ereduaren konfigurazio optimoa aurkitzeko, hiperparametroak hainbat konbinazioekin doitzuz, ahalik eta emaitzarik onena lortzeko. Etapa hori funtsezkoa da datuen analisisan, ereduaren kalitatea errendimendu-metriken bidez ebaluatzeko aukera ematen baitu. Horrek erraztu egiten du hainbat eredu konparatzea eta etorkizuneko probetan iragartzeko gaitasuna izatea, erabakiak hartzerakoan ikuspegi objektiboa eta fidagarria bermatuz.

4.4.1. Azpiatalean, sailkatzailea baliozkotzeko datuak zatitzeko erabilitako hainbat metodologia zehazten dira. Bestalde, 4.4.2. Azpiatalean, eredu baten errendimendua, kasu honetan sailkatzaile bat, neurtzeko aukera ematen duten hainbat metrika azaltzen dira.

### 4.4.1. Datuak zatitzeko metodologiak

Azpiatal honetan, datuak zatitzeko eta algoritmoen errendimendua kalkulatzeko erabilitako metodo batzuk aurkeztuko dira, atxikitzea, abiaraztea eta K-fold baliozkotze gurutzatua barne.

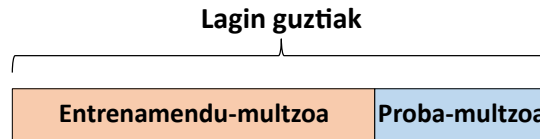
#### Hold-out metodoa (Atxikitzeke metodoa)

Hold-out metodoa datuak zatitzeko teknika bat da, eta askotan erabiltzen da sailkatzaile baten errendimendua ebaluatzeko. Datu-multzoa ausaz bi azpimultzotan zatitzean datza: entrenamendu-multzo bat eta proba-multzo bat. Eredua entrenamendu-datuaren multzoarekin entrenatzen eta baliozkotzen da, doikuntzak egiteko aukera emanez. Ondoren, haren errendimendua ebaluatzen da, proba-multzoa erabiliz. Multzo horrek ereduak aurrez ikusi ez dituen datuak biltzen

#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

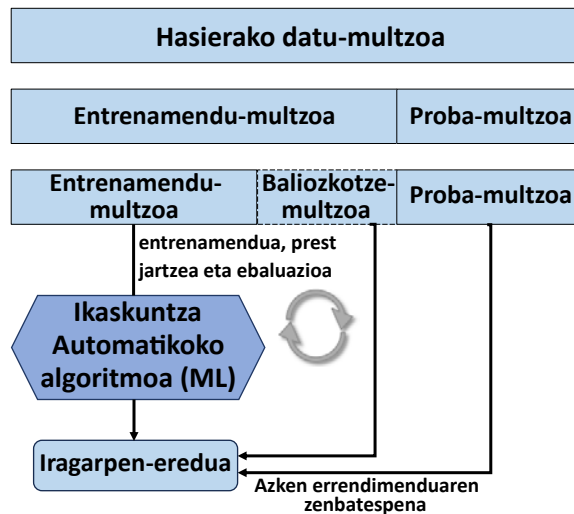
ditu, eta horrek aukera ematen du entrenamenduan zehar egoera ezezagunetara orokortzeko duen gaitasuna baloratzeko [119].

Hold-out metodoan funtsezkoa da datuak ausaz entrenamendu-multzoaren eta proba-multzoaren artean banatzen direla bermatzea; ikus 4.18. Irudia [119]-tik aterata. Horrela, aurrez ikusi gabeko datuetan ereduaren errendimenduaren ebaluazio inpartziala, alborapenik gabea eta fidagarria ziurtatzen da, eta horrek egoera berrietara orokortzeko duen gaitasunaren ebaluazio zehatzagoa egiten du.



4.18. Irudia: Datu guztien ausazko banaketa bi bloketan.

Hold-out metodoa teknika erraza eta eraginkorra da sailkatzaile baten errendimendua ebaluatzeko, baina muga bat du, batez ere datu-multzo txikiekin, datuak bi multzotan banatzean kalkulu ez hain zehatzak egin baititzake. Horregatik, [119]-tik ateratako 4.19. Irudian ikus daitekeenez, sarritan hirugarren datu-multzo bat behar izaten da ereduaren zenbait alderdi doitzeko. Funtsezkoa da, eredia doitu ondoren, azken ebaluazioa egitea, doikuntza-prozesutik erabat independentea. Ikuspegi horretan, datuak hiru multzotan banatzen dira: entrenamendua (datuen %40-50), baliozkotzea (datuen %20) eta proba (datuen %30-40). Zatiketa horri esker, sailkatzailearen errendimenduaren ebaluazio sendoagoa eta objektiboagoa egin daiteke aurrez ikusi gabeko datuetan.



4.19. Irudia: Datu guztien ausazko banaketa hiru bloketan.

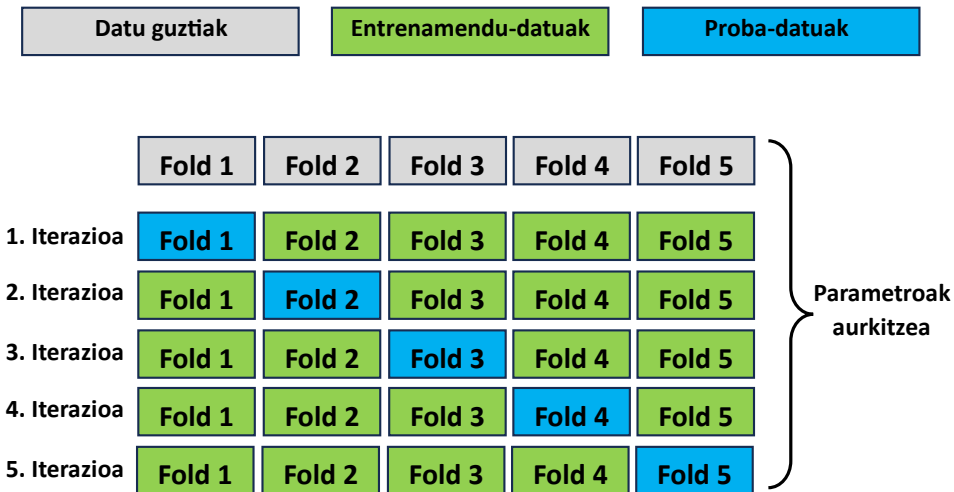


Metodo honek muga batzuk ditu, hala nola, balantzeatu gabeko klaseen erronka eta hasierako datu gutxi daudenean hiru zatiketa egiteko zailtasuna. Desabantaila horiek gainditzeko, ikuspegi sofistikatuagoak daude, hala nola jarraian azaltzen den K-fold baliozkotze gurutzatua.

**K-fold cross-validation (K-fold baliozkotze gurutzatua)**

K-fold baliozkotze gurutzatua Ikaskuntza Automatikoko ereduaren errendimendua ebaluatzeko erabiltzen den teknika da. Ikaskuntzako algoritmoa berez ez bezala, bere funtzioa da ikaskuntzako algoritmo baten orokortzeko gaitasuna zehaztea emandako entrenamendu-multzo batean [119].

Ikuspegi horretan, datu-multzoa antzeko tamainako K azpimultzoetan banatzen da, folds izenekoetan. Ondoren, entrenamendu- eta ebaluazio-prozesua K aldiz egiten da, fold bakoitza proba-multzo gisa erabiliz behin, eta gainerako fold-ak (K-1) iterazio bakoitzeko entrenamendu-multzo gisa. Azkenik, K iterazioetan egindako ebaluazioen batezbestekoa kalkulatu da, eta horrek ereduaren errendimenduaren zenbatespen orokorra ematen du. Prozedura hau 4.20. Irudian ilustratzen da, [120]-tik hartua. Irudi honetan ikusten da datu-multzoa K zati berdinetan banatzen dela, ikuspegi estratifikatua lehenetsiz (non K-rako balio tipikoak 10 edo 5 izan ohi diren, nahiz eta beste balio batzuk ere erabil daitezkeen, hala nola 3 edo 20, aplikazio espezifikoen arabera).



4.20. Irudia: K-fold metodoaren funtzionamendu-metodologia.

K-fold baliozkotze gurutzatua bereziki baliagarria da datu-multzoa txikia denean edo ereduaren ebaluazio sendoagoa bilatzen denean. Partizio asko erabiltzean, datuen banaketa bakar baten mende egotea saihesten da ereduaren entre-

#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

---

natzeko eta ebaluatzeko, eta horrek ebaluazioaren inpartzialtasuna eta zehaztasuna hobetzen ditu. Tresna baliotsua da Ikaskuntza Automatikoko ereduak garatzeko; izan ere, errendimenduaren ebaluazio fidagarriagoa eta objektiboagoa ematen du, ereduak eta hiperparametroak egoki hautatzea errazten baitu.

Abantailak alde batera utzita, K-fold baliozkotze gurutzatuak baditu muga garrantzitsu batzuk. Bere desabantaila nagusia kostu konputazionalan datza, batez ere datu-multzo handiak direnean. K iterazioak egiteak denbora eta baliabide asko eska ditzake, eta, horren ondorioz, kasu batzuetan ez da oso praktikoa izango. Gainera, teknikak ereduaren errendimenduaren estimazio fidagarriagoa ematen badu ere entrenamendu-datuaren multzoan, ez du bermatzen, nahitaez, ikusi gabeko datuak hobeto orokortzea. Beraz, funtsezkoa da kontu handiz aztertzea kostu konputazionalaren eta ebaluazioaren zehaztasunaren arteko oreka, proiektu espezifiko batean K-fold baliozkotze gurutzatua aukeratu aurretik.

Mugetako batzuk konpontzeko, teknika horren aldaerak daude, hala nola baliozkotze gurutzatua, bat kanpoan utzita (*leave one out*), edo baliozkotze gurutzatua, ausazko partizioekin [119]. Lehenengoa baliozkotze gurutzatuko teknika berezia da, eta datuak zatitzeko muturreko ikuspegia erabiltzen du. K-fold baliozkotze gurutzatuan ez bezala, bertan banakako banaketa bat egiten da datu-multzoaren lagin bakoitzerako, lagin bakoitza proba-multzo gisa eta gainerakoak iterazio bakoitzean entrenamendu-multzo gisa erabiliz. Teknika hori egokiagoa da datu txikien multzoetarako, eta ereduaren errendimenduaren zenbatespen zehatzak egin ditzake. Hala ere, ez da gomendagarria datu multzo handientzat, kostu konputazional handia dutelako.

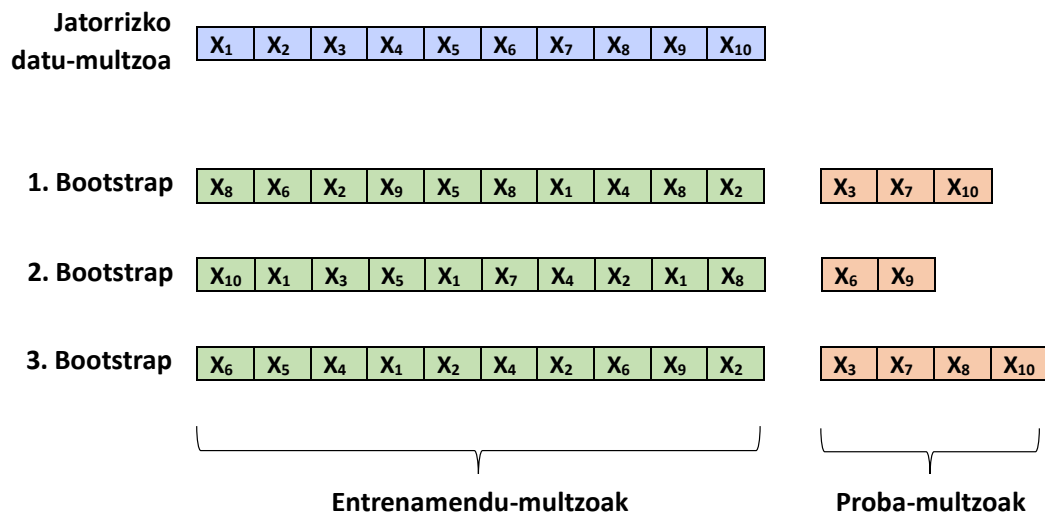
Bigarren aldaerak esan nahi du datu multzoaren zatiketa K aldiz errepikatzea entrenamenduan eta proban, eta iterazio bakoitzean, eredia entrenatu eta ebaluatzen da. Banaketa bakoitzean, datuak ausaz banatzen dira, entrenamendurako eta probarako proportzio konstantea mantenduz. Teknika hau bereziki erabilgarria da datu asko daudenean, azpilaginketa ahalbidetzen baitu ereduak azkarrago eta modu eraginkorragoan entrenatu eta ebaluatzeko.

#### **Bootstrap**

Bootstrapping-a estatistika-teknika bat da, lagin baten ziurgabetasuna neurtzeko erabiltzen dena, behatutako datu-multzo batetik abiatuta. [121]-tik ateratako 4.21. Irudian ikus daitekeen bezala, Bootstrap metodoak behatutako datu-multzo bera erabiltzen du lagin faltsu ugari (Bootstrap laginak) sortzeko ordezkapendun laginketaren bidez. Horri esker, estimazio interesgarriak kalkula daitezke eta konfiantza-tarteak lor daitezke jatorrizko datu-multzoaren parametroetarako.

Iterazio bakoitza guztizko datu-multzoaren tamaina bereko lagin bat lortzean datza, elementuak ausaz ordezkapenarekin ateraz, eta horrek errepikapenak eta datu batzuk ez sartzeko aukera ematen du. Modeloa ateratako laginarekin entrenatzen da eta jatorrizko multzoarekin ebaluatzen da. Hala ere, hautatutako lagina ez da datu-basetik ezabatzen, eta, beraz, hurrengo iterazioan berriz aukera daiteke. Azken zenbatespena iterazio guztien batezbestekoa

hartuz lortzen da. Hala ere, garrantzitsua da kontuan hartzea estimazio hori baikorra izan daitekeela, bi helburuetarako lagin bera erabiltzeak eragindako entrenamendu- eta proba-multzoen arteko gainjartze handia dela eta.



**4.21. Irudia:** Bootstrap metodologia: datuen laginketa-prozesua ordezkapena erabiliz.

Bootstrap metodoak hainbat abantaila esanguratsu eskaintzen ditu. Lehenik eta behin, lagin txikiekin kenkari estatistikoak egitea errazten du, jatorrizko lagina oinarri hartuta birlagin-multzo zabala sortzen baitu. Gainera, laginketa birjartzearekin erabiltzean, birlaginak independenteak direla ziurtatzen du, eta horrek estimazio fidagarriak dakartza. Hala ere, Bootstrap metodoak ere muga handiak ditu. Alde batetik, birlagin kopuru handia sortzea oso garestia izan daiteke konputazionalki, bereziki tamaina handiko jatorrizko laginekin lan egiten denean. Bestalde, Bootstrap estimazioen zehaztasuna jatorrizko laginaren kalitateari lotuta dago, hau da, lagina alboratua bada, Bootstrap estimazioak ere hala izango dira. Azkenik, ez da egokia datu eta arazo mota guztietarako; izan ere, baliteke emaitza onak ez eskaintzea salbuespenezko egoeretan edo oso ezohikoak diren datu-banaketekin.

#### 4.4.2. Errendimendu-metrikak

Orain arte, ereduak ebaluatzeko datuak banatzeko hainbat metodo eztabai-datu dira. Hala ere, ez dira zehaztu ereduak ebaluatzeko metodologietan erabiltako jardunaren metrikak. Horien helburua ereduaren errendimendua eta kalitatea neurtzea da, proba-multzoan lortutako aurreikuspenetan eta emaitzetan oinarrituta. Azpialat honetan errendimendu-metrika ohikoek aurkeztuko di-

#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

ra, arazo jakin batean sailkatzaile desberdinen jarduna alderatzeko funtsezkoak direnak. Metrika horiek funtsezkoak dira ereduaren eraginkortasuna ebaluatze-ko, eta aukera ematen dute zehazteko zein ondo egokitzen den datuetara eta nola jokatzten duen lagin berrien sailkapenean.

Sailkapen-lanetan, ikuspegi komun bat da klaseetako bat erreferentziatzat hartzea eta indize hauek erabiltzea erreferentzia-klase horri dagokionez instantziak behar bezala sailkatu diren irudikatze-ko:

**Benetako positiboak (TP):** behar bezala sailkatutako adibide positiboak, hau da, erreferentzia-klaserako zuzen sailkatu diren instantziak.

**Positibo faltsuak (FP):** modu desegokian positibo gisa sailkatutako adibide negatiboak, hau da, erreferentzia-klaseko gisa sailkatu diren baina bertan ez zeuden instantziak.

**Benetako negatiboak (TN):** behar bezala sailkatutako adibide negatiboak dira, hau da, erreferentzia-klasekoak ez direla zuzen sailkatu diren instantziak.

**Negatibo faltsuak (FN):** modu desegokian negatibo gisa sailkatutako adibide positiboak dira, hau da, erreferentzia-klasekoak ez diren baina bertan sartzen ziren instantziak.

Indize horiek modu argi eta errazean bistaratzeko modu bat nahaste-matrizea da, errore-matrize gisa ere ezagutzen dena, sailkapen-eredu baten errendimendua ebaluatze-ko erabiltzen den taula laburtua [122]. Bertan, iragarpen zuzen eta okerren kopurua laburbiltzen da, klase bakoitzeko banakatuta. Matrize horrek ereduaren errendimenduaren ikuspegi argia ematen du, eta haren sailkapen-gaitasuna hobetzeko arloak identifikatzen laguntzen du. 4.22. Irudiak nahasmen-matrizearen adibide bat erakusten du, eta bertan ikus daiteke nola antolatuko lirartekeen sailkapen baten lau emaitza posibleak, klase bat erreferentziatzat hartuta.

		Iragarpena	
		Positiboa	Negatiboa
Errealitatea	Positiboa	TP	FN
	Negatiboa	FP	TN

4.22. Irudia: Nahaste-matrizea.

		Predicción	
		Positivo	Negativo
Realidad	Positivo	TP	FN
	Negativo	FP	TN

Ikus daitekeenez, nahaste-matrizea funtsezko tresna da sailkapen-arazoetan, Gainbegiratutako Ikaskuntzako algoritmo batek egindako iragarpenak erakutsi behar zituen emaitza zuzenekin erlazionatzean ereduaren jarduna ebaluatzeko. Gainera, ereduak klase bakoitzeko laginak zuzen edo oker sailkatzeko moduari buruzko informazio baliotsua ematen duten hainbat ebaluazio-metrika kalkulatzeko aukera ematen du. Nahaste-matrizearen interpretazioak arazo posibleak azal ditzake, adibidez, klase espezifiko batean lagin gehiago sailkatzeko joera, eta sailkapen-atalaseak egokitzen lagundu, emaitza hobekitzeko.

Indizeak eta horiek bistaratzeko modua azaldu ondoren, jarraian, gehien erabiltzen diren neurketa-metriketako batzuk deskribatuko dira, indize horiekin lan eginez kalkulatzen direnak.

### Asmatutakoen tasa edo Zehaztasuna (Accuracy)

Egindako iragarpen guztien gaineko ereduaren iragarpen zuzenen proportzioa neurtzen du, hau da, ereduak zuzen sailkatu zituen iragarpenen proportzioa adierazten du. Asmatutakoen tasaren kalkulua 4.3 adierazpenean agertzen da.

$$acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4.3)$$

Zehaztasunaren balioa, 4.3 adierazpenean lortua, [0-1] artekoa da. Behin ezaguna denean, errore-tasa (*err*, ingelesez error rate) zuzenean kalkula daiteke 4.4 adierazpenean agertzen den bezala edo alde aurretik zehaztasuna kalkulatu beharrik gabe 4.5 adierazpenaren bidez.

$$err = 1 - acc \quad (4.4)$$

$$err = \frac{FP + FN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4.5)$$

Asmatutakoen eta akatsen garrantzia nabarmen alda daiteke. Adibidez, gaitxotasunen diagnostikoaren kasuan, positibo faltsu bat (FP) onargarriagoa da negatibo faltsu bat (FN) baino [119]. Beraz, testuinguruaren arabera, ohikoa da hainbat neurri erabiltzea akats mota guztien eragina ebaluatzeko eta ulertzeko. Jarraian, errendimenduaren ikuspegi desberdinak modu egokian atzematea ahalbidetzen duten neurri batzuk aurkezten dira.

### Dointasuna (P)

Dointasunak, predikzio-balio positibo gisa ere ezagutzen denak, berreskuratutako instantzien arteko instantzia garrantzitsuen proportzioa adierazten du. Beste era batera esanda, 4.6 adierazpenak erakusten duen bezala, positibotzat sailkatutakoen proportzioa eta benetan positibotzat jotzen direnen proportzioa

#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

---

adierazten ditu. Funtsezko neurria da eredu edo metodo baten zehaztasuna eta fidagarritasuna ebaluatzeko datuen sailkapenean.

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4.6)$$

#### Sentsibilitatea edo Recall (R)

Sentsibilitatea datu guztien lagin positibo guztiekiko benetako positiboen proportzioa da. Beste era batera esanda, 4.7 adierazpenean azaltzen den bezala, sailkatzaileak kasu positiboak behar bezala detektatzeko duen gaitasuna adierazten du. Neurri hori funtsezkoa da eredu edo metodo batek datuen sailkapen baten barruan kasu positiboak behar bezala identifikatzeko duen gaitasuna ebaluatzeko. Sentsibilitate handiak adierazten du sailkatzaileak trebetasun ona duela positibo faltsuak saihesteko eta kasu positiboen sailkapen zehatzak egiteko, eta horrek balio handia du hainbat aplikaziotan, hala nola diagnostiko medikoan eta anomalien detekzioan.

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4.7)$$

#### Espezifikotasuna (S)

Espezifikotasuna datu guztien lagin negatiboen guztien gaineko benetako negatiboen proportzioa da, 4.8 adierazpenean erakusten den bezala. Beste era batera esanda, benetako kasu negatiboak zuzen identifikatzeko gaitasuna neuritzen du. Espezifikotasuna sentsibilitatearen kontrakoa da, kasu positiboak detektatzeko sailkatzailearen gaitasunean zentratzen baita.

$$S = \frac{TN}{TN + FP} \quad (4.8)$$

Espezifikotasunak adierazten du zer gaitasun duen sailkatzaileak alarma faltsuak saihesteko. Espezifikotasun handia bereziki garrantzitsua da positibo faltsuak edo kasu negatiboen sailkapen okerrak minimizatu nahi diren egoeretan. Neurri hori garrantzitsua da hainbat arlotan, hala nola proba medikoetan eta iruzurrak antzemateko sistemetan.

#### Positibo faltsuen tasa (FPR)

4.9 adierazpenean agertzen den positibo faltsuen tasak positibotzat oker sailkatzen diren kasu negatibo guztien proportzioa adierazten du. Beste era batera esanda, sailkatzaileak lagin negatiboak positibo gisa oker identifikatzean sortutako alarma faltsuen kopurua adierazten du. Neurri garrantzitsua da eredu

baten errendimendua eta fidagarritasuna ebaluatzeko, positibo faltsuak minimizatu behar diren egoeretan, hala nola iruzurrak antzemateko edo medikua-ren diagnostikoa egiteko sistemetan. Positibo faltsuen tasa zenbat eta txikiagoa izan, orduan eta zehatzagoa eta fidagarriagoa izango da mota horretako erroreak saihesteko sailkatzailea.

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} = 1 - S \quad (4.9)$$

### **F1-Score edo F1 Puntuazioa**

F1-Score neurketak metrika bakarrean doitasuna eta sentsibilitatea (recall) orekatzea du helburu. 4.10 adierazpenak erakusten duen bezala, bi neurketen batezbesteko harmoniko gisa kalkulatzen da. Bere balioa 0 eta 1 artekoa izan daiteke, non 1ek dointasan eta sentsibilitate perfektua adierazten duen, eta 0k errendimendu eskasa adierazten duen.

$$F1 = \frac{2 * P * R}{P + R} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \quad (4.10)$$

F1 puntuazioa ereduaren zehaztasuna eta sendotasuna islatzen dituen neurria da. Bereziki erabilgarria da datu-multzo desorekatu bat dagoenean, kasu positibo eta negatiboen kopurua oso desberdina baita, bi neurriak ere haztatzen baititu.

Oro har, F1en balio handi batek adierazten du ereduak oreka ona duela dointasanaren eta sentsibilitatearen artean, eta horrek esan nahi du gai dela kasu positiboak zein negatiboak behar bezala sailkatzeko. Sailkapen-lanetan asko erabiltzen den metrika da, eta bere maximizazioa helburu komuna da hainbat eredu eta algoritmo ebaluatzean eta alderatzean.

### **ROC kurbaren azpiko eremua (AUC-ROC)**

ROC (Hartzailearen Ezaugarri Operatiboa, ingelesetik Receiver Operating Characteristic) kurbaren azpiko eremuak ereduak klase positiboak eta negatiboak bereizteko duen gaitasuna neurtzen du, eta errendimenduaren ebaluazioa egiten du mozte-probabilitatea hainbat puntutan.

Sailkatzaile askok iragarpenak egiten dituzte horiei lotutako ziurgabetasun-maila kuantifikatzean. Adibidez, Naïve Bayesen algoritmoa edo Erregresio Logistikoa erabiltzean, probabilitateak lortzen dira emaitza gisa, eta Euskarri-Bektorialeko Makinek (SVM), berriz, erabaki-mugaren hurbiltasuna neurtzen dute. Normalean, klase positiboa aurreikusten da probabilitatea 0.5etik gorakoa denean (edo SVMren kasuan, ebaluazioa positiboa denean). Hala ere, onarpen-atalasea doitu daiteke, sailkatzailea zorrotzagoa izan dadin adibide bat positibotzat sailkatzean. Atalase hori aldatzean, hainbat metrika-balio lortuko lirate-

#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

---

ke (P, R, FPR, F1, besteak beste), sailkatzaile eta datu-multzo bera erabiliz. Doikuntza hori egitean, ereduaren metriken arteko oreka desberdina lortzen da.

Horrelako doikuntzak egiten direnean, posible da grafikoki irudikatzea nola aldatzen diren metrikak atalase hori aldatzen den heinean. Bistaratze hori lagungarria izan daiteke bi metriken arteko konpromiso gogobetegarria zein puntutan lortzen den zehazteko (ahal bada), baita sailkatzaile desberdinak alderatzeko ere. Kurbak argiago ulertzen du nola eragiten dion ereduaren errendimenduari atalasearen doikuntzak, eta horrek erraztu egiten du sailkatzailearentzako konfigurazio egokiari buruzko erabakiak hartzea.

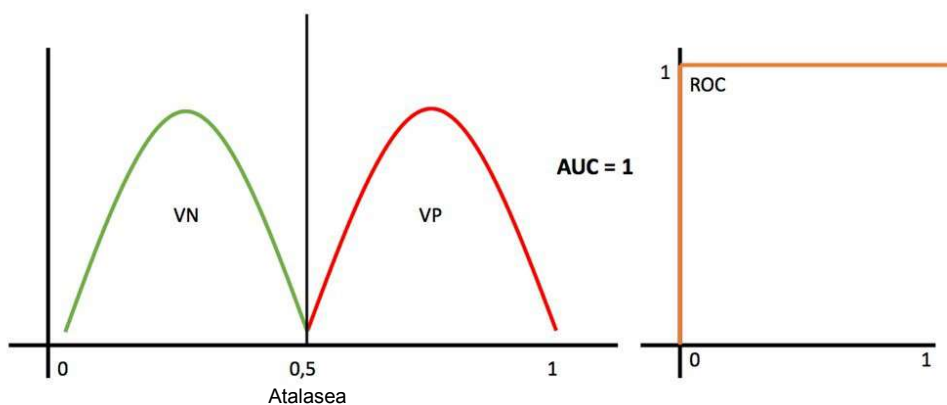
ROC kurba tresna grafikoa da, eta Y ardatzeko benetako positiboaren tasa (sentsibilitatea edo recall) eta X ardatzeko positibo faltsuen tasa (FPR edo  $1 - \text{espezifikotasuna}$ ) adierazten ditu, erabakitze atalaseak aldatzean pareta (FPR,R) nola aldatzen den erakutsiz. Sailkapen-eredu baten errendimendua ebaluatze erabiltzen da, atalasea doitzeko eta ereduaren sentsibilitatearen eta espezifikotasunaren arteko oreka desberdina lortzeko aukera emanez.

ROC kurban, sailkatzaile ideal bat (0,1) puntuan kokatuko litzateke, eta horrek adierazten du %100eko sentsibilitatea (benetako positibo guztiak zuzen identifikatzen ditu) eta %100eko espezifikotasuna (ez dago positibo faltsurik). Oro har, ROC kurba puntu ideal honetatik zenbat eta gertuago egon eta ausazko sailkatzaile batek irudikatzen duen lerro diagonaletik zenbat eta urrunago egon, orduan eta hobea izango da ereduaren errendimendua. ROC kurbak diagonalarekiko duen distantziak iradokitzen du ereduak gaitasuna duela klaseen artean bereizteko eta bere jardunaren ebaluazio eraginkorragoa emateko.

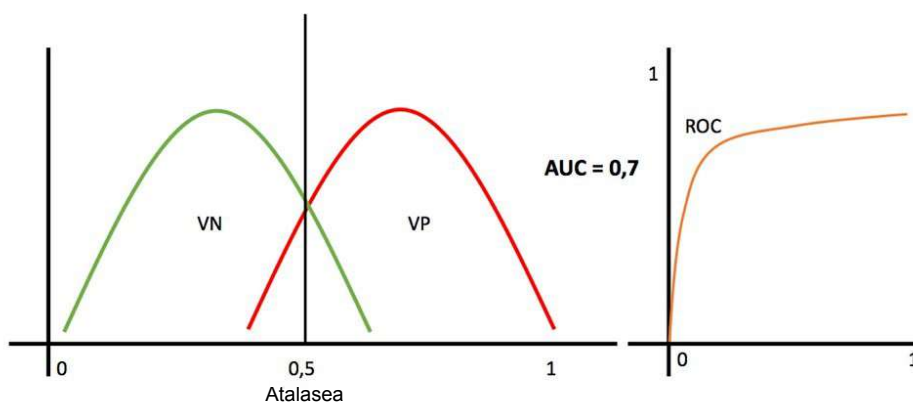
ROC kurbaren azpiko eremua (AUC-ROC) modeloaren errendimendua laburbiltzen duen zenbakizko metrika bat da. 1eko AUC-ROC batek errendimendu perfektua adierazten du, eta 0.5eko AUC-ROC batek, berriz, zoriaren antzeko jardura adierazten du. AUC-ROCen balioa 0.5etik gorakoa bada, baina 1etik beherakoa, ereduak ausazko sailkatzaile batek baino diskriminazio-gaitasun hobea duela esan nahi du, nahiz eta zenbait sailkapen-eremutan muga batzuk izan ditzakeen. AUC-ROC 1etik zenbat eta hurbilago egon (idealki 1, baina gutxienez 0.7tik gorakoa), orduan eta hobea izango da ereduaren errendimendua. Neurri horrek informazio baliotsua ematen du ereduak sailkapen zehatzak egiteko eta klaseak sailkapen-arazoan bereizteko duen gaitasunari buruz.

Jarraian, 4.23., 4.24., 4.25. eta 4.26. Irudiak agertzen dira, [123]-tik ateratakoak, ROC kurbaren azpiko eremuarekin lotutako hainbat egoera grafikoki ilustratzen dituztenak. Adibide horietarako, alde zurretik ezarri da klase positiboa (positibo gisa etiketatutako kasuak) atalasearen gaineko tarteari dagokiola ( $[0.5-1]$ ), eta klase negatiboa (negatibo gisa etiketatutako kasuak), berriz, atalasearen azpitik dagoela ( $[0-0.5]$ ). Adibide grafiko horiek ikusizko perspektiba bat eskaintzen dute, eta, halaber, zera adierazten dute: metrika horiek nola aldatzen diren eta nola ebalua daitekeen sailkapen-eredu baten jarduna egoera desberdinetan.



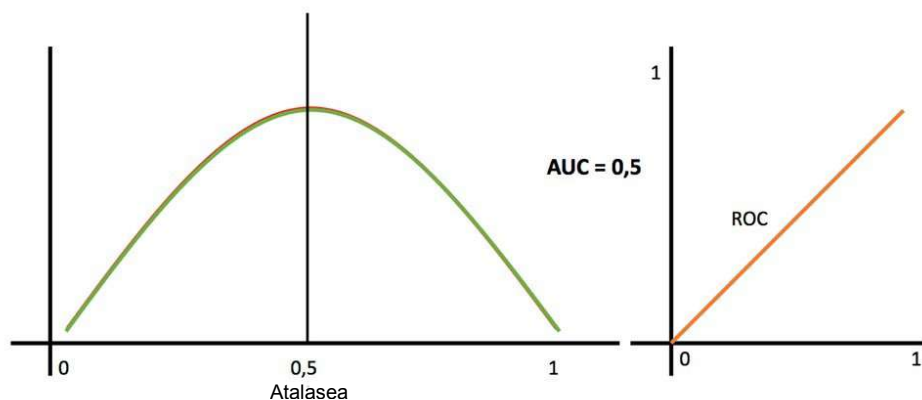


**4.23. Irudia:** AUC 1. adibidea: egoera ideala. Benetako negatiboen kurba berdea (VN) zein benetako positiboen kurba gorria (VP) ez dira inola ere gainjartzen, eta, beraz, ereduak banantzeko neurri ideala du. Oso gai da klase positiboa eta negatiboa bereizteko.

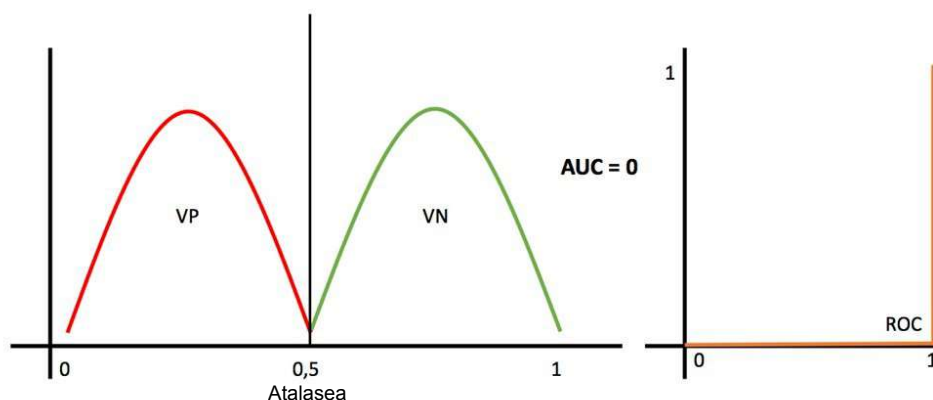


**4.24. Irudia:** AUC 2. adibidea: bi kurbak (VN eta VP) gainjartzean erroreak sartzen dira. Atalaseren arabera, minimizatu edo maximizatu egin ditzakegu. AUC 0.7 denean, esan nahi du %70eko probabilitatea dagoela ereduak klase positiboa eta negatiboa bereizteko. Kurba berdearen (VN) azpiko azalera, atalasea gaınditzen duenean, positibo faltsuztat (FP) joko litzateke. Atalasearen aurretik dagoen kurba gorriaren (VP) azpiko azalera negatibo faltsu gisa sailkatuko litzateke (FN).

#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK



**4.25. Irudia:** AUC 3. adibidea: VN eta VP kurben gainjartze osoa. AUC gutxi gorabehera 0.5 denean, ereduak ez du klase positiboaren eta klase negatiboaren artean bereizteko diskriminazio-gaitasunik, eta hori da egon daitekeen egoerarik okerrera.



**4.26. Irudia:** AUC 4. adibidea: AUC 0 inguru denean, ereduak klaseak alderantziz egokitzen ari da. Esan nahi du ereduak klase negatiboa klase positibo gisa aurrezaten duela, eta alderantziz.

Laburbilduz, ROC kurba tresna baliotsua da hainbat sailkapen-ereduren errendimendua ikusteko eta alderatzeko, eta aukera ematen du arazo horretarako erabaki-atalaserik egokiena hautatzeko. Irudikapen grafiko horrek erabakiak hartzea errazten du, sailkatzaileen diskriminazio-gaitasuna ebaluatzean eta hobetzean, eta hori funtsezkoa da sailkapenaren emaitzak optimizatzeke.

## 4.5. Garrantziaren analisisa. Test estatistikoak

Ikerketa askotan, behin eta berriz sortzen da estatistika-probak behar ez bezala erabiltzearekin lotutako problematika bat, eta hori ikerketaren kalitatean eragin zuzena duten faktore askori egotz dakieke. Behar bezala maneiatu eta aplikatu ezean, ikerketa ez litzateke zorrotza eta sendoa izango. Egoera horretan, funtsezko galdera bat sortzen da: nola egin hipotesi-proba eraginkor bat ikerketa batean eta nola aukeratu behar diren proba-estatistiko egokiak [124].

Hainbat hipotesiren ebaluazio zehatza egiteko egokiak diren estatistika-metodoen hautaketari buruzko zalantzak argitzeko, garrantzitsua da azpimarratzea bi kategoria nagusi daudela: proba parametrikokoak eta ez-parametrikokoak.

Lehenengoei dagokienez, proba parametrikokoak tresna matematikokoak dira, eta datuen banaketa-funtzioaren aurretiazko ezagutza eskatzen dute. Beste era batera esanda, proba horiek onartzen dute datuek banaketa espezifiko bati jarraitzen diotela. Abantailak alde batera utzita, hala nola probabilitate-kalkuluaren zehaztasun handia eta errorearen probabilitate txikia, mugak ere badituzte, adibidez, azter daitezkeen datuak mugatuak direla, aurrez definitutako banaketa-funtzioarekin bat datozenak bakarrik azter baitaitezke. Proba parametrikoen adibide batzuk honako hauek dira: Student-en t proba [125], bariantza-analisisa (ANOVA) [126], eta erregresio lineala [127, 128].

Proba ez-parametrikoei dagokienez (banaketa libreko probak ere esaten zaie), hipotesi jakin batzuetan oinarritzen dira, baina ez dute alde aurretik datuak banatzeko funtzioaren berri izan behar. Horrek esan nahi du aztertu beharreko datuek ez dutela aurrez definitutako antolamendurik. Proba horiek erabiltzearen abantailen artean, nabarmentzekoa da, alde batetik, malguagoak direla eta hainbat egoeratan aplika daitezkeela, ez baitute eskatzen datuek parametro zorrotzak betetzea. Bestalde, zenbakizkoak ez diren datuak aztertzeo egokiak dira. Hala ere, datuen banaketa alda daitekeela adierazten dute, eta horrek zaildu egiten du datuak aztertzeo aukera egokia. Proba horien adibide batzuk dira Wilcoxon-en proba [129] eta Friedmanen proba edo testa [130].

Jarraian, tesi hau osatzen duten azterlanetan erabilitako sailkatzaileen jarduna alderatzeko egindako bi analisi motak aurkezten dira.

### **Friedmanen testa**

Friedmanen testa funtsezko tresna da analisi estatistiko ez-parametrikoen esparruan, eta datu-multzo ugari alderatzeko erabiltzen da, neurketak subjektu edo unitate esperimenteren talde berean errepikatzen diren egoeretan. Metodo hori aukera jakintsu bihurtzen da datuek normaltasun-kasuak betetzea lortzen ez dutenean, edo aldagaiek egitura ordinala dutenean; horrek esan nahi du mailatan edo kategoriatan antolatzen direla zenbakizko eskala zehatzik izan gabe [130].

Garrantzitsua da nabarmentzea Friedmanen testa bereziki baliagarria dela baldintza esperimenterak alda daitezkeen egoeretan, eta aldaketa horiek neuritutako aldagaien batezbesteko tartetean alde esanguratsuak sortzen dituzten

#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

---

ulertzea. Ikuspegi parametrikoko kontrasteen, metodo honek ez du eskatzen datuek banaketa espezifiko bati jarraitzea, eta horrek sendo agerrarazten du banaketa irregularren edo asimetrikoen aurrean. Gainera, aldagaien izaera ordinala kontuan hartuta, Friedmanen testak datuak aztertzeke modu eraginkor bat eskaintzen du, zenbakizko eskala zehatzik izan ez dezaketenak, baina, hala ere, ikerketarako funtsezkoak direnak.

Friedmanen testaren helburua da neurketen batezbesteko tartetean alde nabarmenak dauden zehaztea, talde edo egoera desberdinetan. Bere helburu nagusia hasierako hipotesi bat ezeztatzea da, ebaluatutako konparatu beharreko elementuen artean alde garrantzitsurik ez dagoela iradokitzen duena. Hasierako hipotesi hori baztertzen denean, baliozkotzat jotzen dira desberdintasun esanguratsuak adierazten dituzten ikerketaren emaitzak. Ebaluazio hori egiteko, urrats hauek egiten dira: lehenik, hainbat elementuren (subjektuak edo gauzak) neurketak biltzen dira, baldintza desberdinetan. Ondoren, ordenan jartzen dira, txikienetik handienera, taldea kontuan hartu gabe. Ondoren, zerrendan duten posizioaren arabera zenbaki bat (maila edo rangoa) ematen zaie, eta berdinketarik balego, batezbestekoa egiten da. Azken-aurreko urratsa talde bakoitzaren tartea batu eta batezbeste egitea da. Azkenik, probako estatistika deritzon zifra bat kalkulatu da, batezbesteko tarteen aldeak ber bi erabiliz, baldintzek eta neurketek doituta, ikus 4.11 adierazpena.

$$Fr = \frac{12}{nk(k+1)}(R_1^2 + R_2^2 + \dots + R_k^2) - 3n(k+1) \quad (4.11)$$

non  $n$  konparatu beharreko elementuen guztizkoa den,  $k$  baldintza guztien guztizkoa den eta  $R_k^2$  baldintza bakoitz ber bi-ko mailen batukaria den; azkenean, zifra hori balio kritiko batekin alderatzen da, taldeen artean desberdintasun garrantzitsuak dauden jakiteko.

#### **t korrelatu bayestarra proba (test BC)**

t korrelatu bayestarra proba oso tresna erabilgarria da baliozkotze gurutzatuko teknikaren algoritmoak ebaluatzeke (algoritmo batek egoera desberdinetan nola funtzionatzen duen probatzeko modu bat). t proba komunak emaitzak independenteak direla proba bakoitzean esan nahi du; t BC probak, berriz, emaitzen arteko erlazioa hartzen du kontuan, baliozkotze gurutzatuan errepikatzen diren zatiengatik. Gainera, [131]-n aipatzen den bezala, t proba konbentzionalak eragin handia du laginaren tamainagatik, eta, gehienetan, baztertu egiten da alderatu beharreko bi elementu baliokideak izatearen ideia. Murrizketa horiekin batera, beste batzuekin batera, t korrelatu bayestarra proba aukera egokiago gisa aurkezten da hainbat sailkatzaile alderatzeko. Xehetasun gehiago aurki daitezke aipatutako erreferentzietan [131] eta [132].

Ildo horretan, BC testak egiantzekotasun-funtzioa eta aurretiko banaketa erabiltzen ditu algoritmo batek beste batek baino hobeto funtzionatzeko ondorengo banaketa kalkulatzeko. Horrela, metodo hau erabil daiteke, adibidez, bi sailkatzaileen errendimendua metrika jakin batzuen arteko bikoteka konpa-

razioak egiteko. Algoritmo batek beste batek baino errendimendu hobea izateko ondorengo probabilitatea kalkulatzeko, metodoak 4.12-n erakusten den datuen eredu sortailea erabiltzen du.  $x_{nx1}$ -k  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  bektorea adierazten du. Bektore horrek bi sailkatzaileek lortutako zehaztasunen (edo beste metrika baten) arteko aldeak jasotzen ditu, eta neurketa horiek  $n$  neurketetan zehar eta baliozkotze gurutzatuko prozesuan alderatzen dira.  $1_{nx1}$  lez beteko bektore bat da, eta bektore hori  $\mu$  interes-parametroarekin biderkatu egiten da. Kasu honetan, alderatu beharreko parametroa zehaztasuna denez,  $\mu$ -k batezbesteko zehaztasunaren aldea adierazten du. Azkenik,  $v$  zarata normal multibarioduna da, kobariantza 0 duena.

$$x_{nx1} = 1_{nx1}\mu + v_{nx1} \quad (4.12)$$

Proba hau bikoteka egindako konparazio bat da, eta metrika jakin bat erabiltzen du, errendimendua adibidez, bi algoritmo haien artean alderatzeko. Test mota honen oinarria algoritmo jakin batek bere aurkariaren aldean hobe-okerbaliokidea aukeratutako metrikaren balioa lortzeko ondorengo probabilitatea kalkulatzeko da. [131]-n, datuen egiantzekotasun-eredurako eta ondorengo  $\mu$  banaketarako adierazpena lortzen da, Student-en banaketa batekin bat datorrena, eta, horrela, algoritmoetako bat bestea baino hobeto funtzionatzen ari den edo haren metrika, kasu honetan zehaztasuna, baliokidea den erabakitzen da. Ildo horretan, prozesu hori egiten denean, aukeratutako metrikaren (kasu honetan, zehaztasuna) ondorengo probabilitate-dentsitatearen funtzioa (PDF) kalkula eta grafika daiteke, eta, horrela, algoritmoetako bat bestea baino hobeto funtzionatzen ari den edo haren zehaztasuna antzekoa den eta, beraz, baliokidetzat jotzen diren erabaki.

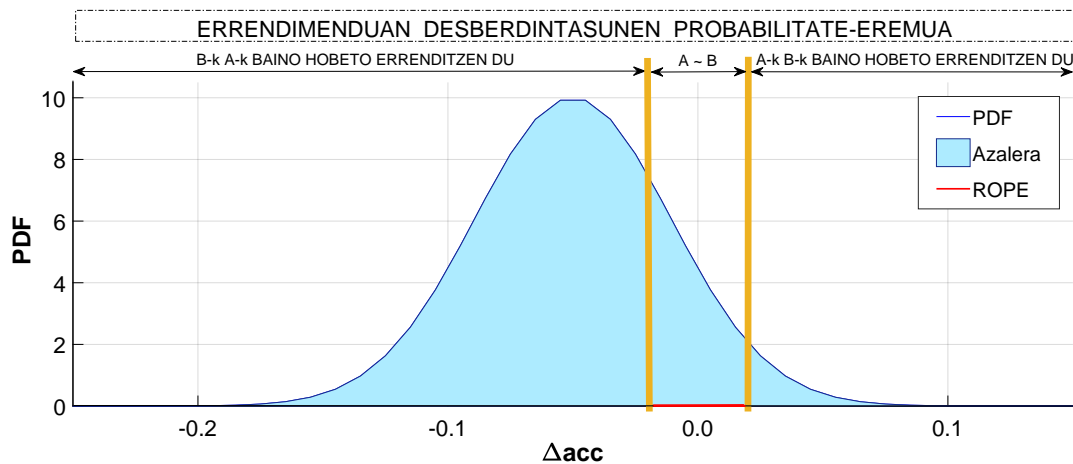
Ondoren, askoz ere argiago jokatzeko, [131]-tik hartutako adibideak erabiliko dira, PDFa datu-multzo batean bi sailkatzailearen errendimendua alderatzeko erabil daitekeela erakusteko.

Lehen adibidea 4.27. Irudian agertzen da. Irudi horrek bi sailkatzailearen arteko (A eta B) zehaztasun edo *accuracy* diferentziaren PDFa adierazten du, erreferentzia gisa A-ren zehaztasuna erabiliz:  $\Delta acc = acc\_Alg\_A - acc\_Alg\_B$ .

Irudi horretan, kontuan hartu beharreko bi alderdi nagusi daude. Lehenik eta behin, bi lerro laranja mugatutako eremu bat ikusten da, ROPE eremua (Region Of Practical Equivalence, [132]) izenez ezagutzen dena. Eremu horrek bi sailkatzaileen arteko zehaztasun-aldea %1etik beherakoa den muga ezartzen du (hau da, 0.01). ROPErako balio hau aukeratzen da *accuracy*-ren diferentzia %1 baino txikiagoa denean, konparatutako algoritmoek modu baliokidean funtzionatzen dutela jotzen delako. Gainera, dentsitate-funtzioak ROPEren ezkerre-ranzko alborapena erakusten duela nabaritzen da. Ezkerre-ranzko joera horrek B algoritmoak A gainditzeko probabilitate handiagoa adierazten du ( $\Delta acc$  negatiboa da gehienetan). Kasu zehatz honetan, ROPEren ezkerreko eremua  $p = 0.788$  da (horrek iradokitzen du B normalean A baino hobea dela). Ondorioz, ROPEren barruko eremuak A-k eta B-k errendimendu baliokidea izateko  $p = 0.086$  probabilitatea adierazten du, hau da, ez da oso gertagarria balioki-deak izatea. Azkenik, ROPEren eskuinaldeko eremuak adierazten du  $p = 0.126$

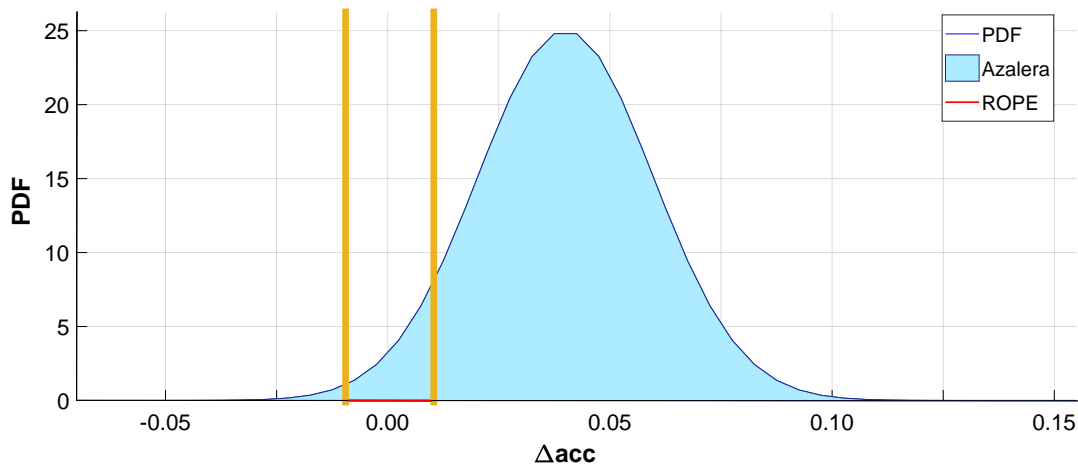
#### 4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO TEKNIKAK

probabilitatea dagoela A algoritmoak B algoritmoak baino zehaztasun hobea izateko (hori gertatzeko probabilitate txikia).



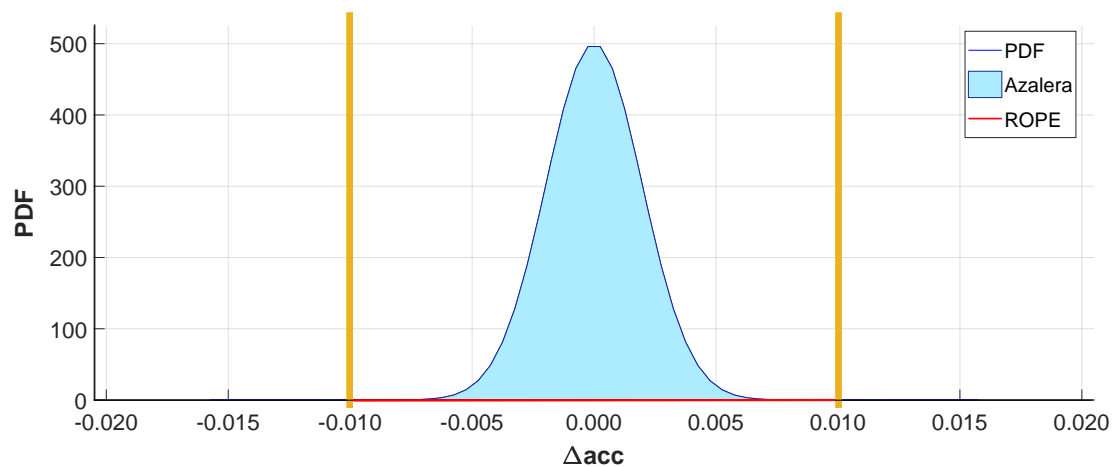
**4.27. Irudia:** t-BC banaketa. 1. adibidea: ia beti  $\Delta acc < 0$ .

Aurreko adibidean ez bezala, 4.28. Irudiaren kasuan kontrako egoera agertzen da: PDFak ROPEren eskuinaldera egiten du, eta horrek adierazten du kasu honetan A algoritmoak B algoritmoak baino zehaztasun handiagoa izateko probabilitate handiagoa dagoela,  $\Delta acc$  gehienetan positiboa baita.



**4.28. Irudia:** t-BC banaketa. 2. adibidea: ia beti  $\Delta acc > 0$ .

Azkenik, 4.29. Irudian, hirugarren eta azken adibideak A eta B algoritmoak zehaztasunari dagokionez baliokideak direla baieztatu daitekeen egoera bat erakusten du; izan ere, PDF ia osoa ROPE eremuaren barruan dago, eta probabilitate oso txiki batek adieraziko luke Ak edo Bk bere aurkariak baino hobeto funtzionatzeko dutela (kasu gehienetan  $-0.1 < \Delta acc < 0.1$ ).



**4.29. Irudia:** t-BC banaketa. 3. adibidea: ia beti  $-0.1 < \Delta acc < 0.1$ .

4. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAN OINARRITUTAKO  
TEKNIKAK

---



III. Zatia

**EKARPENAK**



## 5. Kapituluia

# Ikaskuntza Automatikoak disreflexiaren diagnostikoari egindako ekarpenak

### 5.1. Hitzaurrea

2.3. Atalean aipatu den bezala, disreflexia autonomoa (DA) bizkarrezur-muineko lesioa (BML) duten pazienteen artean sarriago gertatzen den gaixotasun potentzialki hilgarria da. Klinikoki, hiperaktibitate sinpatiko baten ondoriozko hipertentsio akutuko gertakariak ditu ezaugarri. Erasan horren gertakari batean, gorputzaren behealdeko bulkada aferenteek tonu sinpatikoa bat-batean handitzen dute, eta basokonstriktzioa sortzen dute, eta horrek presio arterial sistolikoa hasierako baliotik 20 mmHg baino gehiago handitzen du [34,35]. Nerbio lausoak eta nerbio glosofaringeoez bizkarrezur-muinetik transmititzen ez dutenez, funtzio kardiobaskularrak bere horretan jarraitzen du BMLren ondoren [5,6], eta aktibatutako atzeraelikadura-sistemak bradikardia erreflexua sortzen du.

DAren presentzia eta larritasuna oso aldakorak dira BML duten pazienteen artean, eta ez dirudi lesioaren mailaren arabekoak direnik. Nahiz eta erasan hori edozein unetan gerta daitekeen lesioaren mailatik beherako estimulu bat gertatzen denean, ohikoenak, lehenik eta behin, maskuriko distentsioa [39,40] dira, eta, ondoren, inpaktu fekala [34]. Beraz, maskuriko betetze kontrolatua proba diagnostikorik ohikoenetako bat da BML duen paziente batek DA duen zehazteko. Hala ere, azterketa gutxik ebaluatu dute patologia horren maiztasuna eta larritasuna maskuria bete eta hustean (adibidez, mikzio erreflexu edo gernuzundaketa iraunkor edo aldizkakoaren bidez) [38].

DA agertzearekin lotzen diren faktoreak identifikatzea, alde aurretik BML duten zein pazienteek izan ditzakeen gaixotasun horren gertakariak jakiteko, funtsezkoa da ondorio hilgarriak saihesteko, hala nola, iskemia miokardikoa edo

## 5. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAK DISREFLEXIAREN DIAGNOSTIKOARI EGINDAKO EKARPENAK

---

garuneko odoljariora [42–44, 133, 134].

Gaur egun, proba kliniko autonomiko ez-inbaditzaileak eta ondo baliozko-tuak eskuragarri daude ingurune klinikoan. Funtzio sinpatikoaren eta kardio-baskularraren ebaluazioa barne hartzen dute, bihotz-maiztasunaren (FC) kontrolaren eta presio arterialaren (PA) bidez, hainbat maniobrari dagokienez, hala nola arnasketa sakonari, Valsalvaren maniobrari edo burua gorantz makurtzeko probari dagokienez. Horrelako proben bidez, DA izateko arrisku handiena duten pazienteak identifika daitezke, ez bakarrik patologia horren kontrola hobetzeko, baita gaixotasun hori agertzearekin lotutako konplikazio larrien tasa murrizteko ere. Testuinguru horretan, kapitulu honetan aurkeztutako ikerketaren helburu nagusia gaixotasunaren hasierako diagnostikoa ahalik eta modu ez-inbaditzaileenean lortzea izan zen.

### 5.2. Datu-bilketa

Esan bezala, maskuria betetzea da bizkarrezur-muineko lesioak dituzten pazienteengan DA gertaera bat eragiteko kausa ohikoena. Gainera, talde mediko batek maskuria betetzea erraz kontrola eta birjar dezake ospitaleko instalazioetan, eta ez du arrisku handiagorik pazienteentzat. Hori horrela, ikerketa-taldeak egoera hori laborategian simulatzea erabaki zuten, DAren hasierako diagnostikoaren arazoa sakonago aztertu ahal izateko.

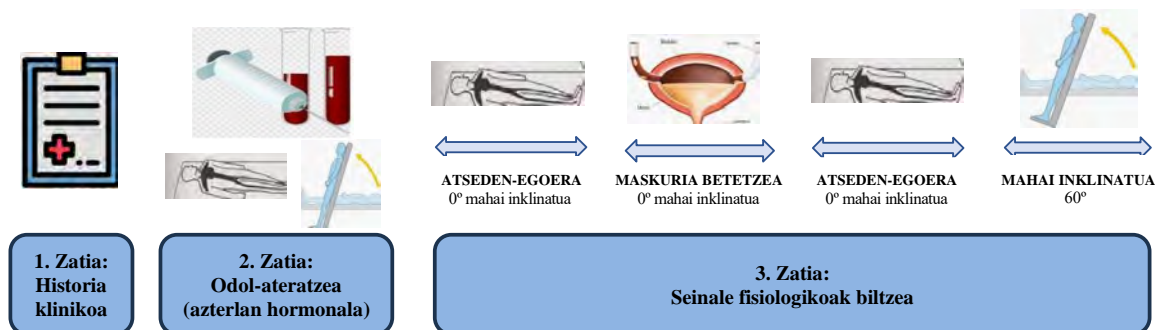
Ikerlana egiteko beharrezko datuak biltzeko esperimentazioa Gurutzetako Unibertsitate Ospitaleko (GUO) talde medikoekin lankidetzan egin zen. BML zerbikala edo torazikoa eta gutxienez 18 urteko adina izatea izan ziren sartzeko irizpideak. Baztertzeko irizpideak presio-ultzerak edo larruazalari eragiten dioten beste arazo batzuk izatea izan ziren. Gainera, proba egin aurreko 24 orduetan, neurketa hemodinamikoetan eragina izan zezakeen edozein farmako hartzea eten zen eta pazienteei hesteak eta maskuria hustu behar izan zitzaizkien ebaluazioa egin aurretik. Euskal Autonomia Erkidegoko Ikerketa Klinikoko Batzordeak onartu zuten ikerlana, PI2013132 baliozkotze-kodearekin, eta pazienteek baimen-formulario bat sinatu zuten azterketan sartu aurretik, Helsinkiko Adierazpenaren printzipioekin bat etorritik [135].

Azterlanaren laginari dagokionez, BML zuten 37 pazienteek osatzen zuten (27 gizon eta 10 emakume), 17 eta 77 urte bitartekoak (batezbestekoa = 42.4 eta desbideratze tipikoa (DT) = 14.1 urte). Lesioa gertatu zen unean, pazienteak 17 eta 68 urte bitartean zeuden (batez bestekoa = 33.3 eta DT = 15.6 urte), baina gizonak emakumeak baino gazteagoak ziren une horretan (gizonak  $39.6 \pm 13.4$  urterekin jasaten zuten lesioa, eta emakumeek, berriz,  $49.7 \pm 13.8$  urterekin). Lesioaren estadia akutua (lesiotik urtebete baino gutxiago) 14 pazienterengan (%37.8) izan zen eta kronikoa (lesiotik urtebete baino gehiago) 23 pazienterengan (%62.2), antzeko proportzioarekin bi sexuetan. Kausari dagokionez, BMLa 33 pazienteren traumatismo baten ondorio izan zen (%89), eta kausa mediko bat izan zuten 4 pazienterengan (%11). Kasu gehienetan, BMLa zerbikaletan izan zen (tetraplegia) (32 paziente, %86.5), eta gainerakoek BML torazikoa zuten (paraplegia) (5 paziente, %13.5).

BMLren larritasuna proba klinikoaren eta azterketa erradiologikoen bidez ebaluatu zen, gabezia motorrak eta sentorialak eta haien inplikazio funtzionalak neurtuz, American Spinal Cord Injury Association-en (ASIA) [35] Bizkarrezur Muineko Lesioen Sailkapen Neurologikorako Nazioarteko Estandarretan (ISNCSCI) [35] oinarrituta. Zehazki, ASIAREN narriadura-eskalak dauden bost kategorietako batean sailkatzen ditu pazienteak: bizkarrezur-lesio osoa (A), lesio motor osoa eta lesio sentorial osatugabea (B), lesio motore eta sentisitibo osatugabea (C edo D, defizitaren hedaduraren arabera) edo normala (E).

Nerbio-sistemaren erasanari dagokionez, Estandar Autonomikoak Ebaluatze-ko Formularioa (ASAF) erabiliz ebaluatu zen. Formulario horrek funtzio autonomo orokorra, heste-funtzioa, beheko gerru-traktuaren funtzioa eta uroinamika betetzen ditu. Gainera, pazienteen datuak bildu ziren, BML duten pazienteen arrisku-faktoreei erreferentzia eginez, BMLn funtzio kardiobaskularren nazioarteko datu-basean definituta [136]. Datu horietan, besteak beste, hipertentsioa, hiperlipidemia, diabetes mellitusa, hipotentsio ortostatikoa, gehiegizko pisua eta DA bera sartu ziren.

Datuak biltzeko eta disautonomia ebaluatzeko protokolo esperimentalaren 5.1. Irudian agertzen diren hiru etapetan banatu zen. Etapa horiek beti mediku baten eta erizain baten ikuskaritzapean egiten dira, eta jarraian deskribatuko dira.



### 5.1. Irudia: Esperimentu-etapak.

Esperimentuaren lehen etaparen, pazientearen historial klinikoaren datuak bildu ziren, hala nola BML gertatu zen bizkarrezur-muinaren maila, lesio mota, esfinterren funtzionamendu-maila, aurretiko sintomatologia, etab. (datu hauen izaerari buruzko informazio gehiago emango da 5.5.1. Azpiatalean).

Bigarren etaparen, pazientearen mahaia kulunkari baten gainean jarri eta bulardeari eta beheko gorputz-adarrei eutsi zieten. Ondoren, pazientearen mahaia gainean jarrita uzten zuten ahoz gorako posizioan (0°) eta klinikoek odol-lagin bat (30ml) ateratzen zuten pazientearen besotik. 3 minutu geroago, medikuek 60°-tan makurtu zuten mahaia, pazientearen burua altxatuta utzita, eta beste odol-lagin bat hartu zuten. Bigarren erazketa horren arrazoia bi odol-laginen arteko aldaketa hormonalak alderatu ahal izatea zen. Hain zuzen ere, konparazioa katekolaminen mailen artekoa litzateke (adrenalina, noradrenalina, dopamina eta

## 5. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAK DISREFLEXIAREN DIAGNOSTIKOARI EGINDAKO EKARPENAK

---

basopresina). Hormona horiek, aminikoak ere esaten zaienak, odol-fluxuan daude. Horrela, hormona horiek gehiegi askatuz gero, BML baten mailaren azpitik dagoen estimulu mingarri edo narritagarri batek pazientearen presio arteriala nabarmen handitzea eragin dezake. Horregatik, hormonon balioak alderatzea interesgarria izan zen azterlan honetarako.

Ospitalearen protokoloari jarraituz, hirugarren eta azken etapa pazienteei gernu-kateter bat jarri zitzaien (maskuria betetzeko), bai eta seinale fisiologikoen jarraipena egiteko eta horiek biltzeko elektrodo egokiak ere, Task Force Monitor gailu batekin (CNSystems®). Esperimentuaren hirugarren zatian lau seinale fisiologiko bildu ziren: presio arterial sistolikoa eta diastolikoa, bihotz-maiztasuna eta erresistentzia periferiko osoa. Gero, elektrodoak eta kateterra jarri ondoren, pazientearen oinarrizko balio fisiologikoak 10 minutuz erregistratu ziren, pazientea mahaian 0°-tan etzanda zegoen bitartean. Gero, pazientearen seinale fisiologikoak erregistratzen ziren bitartean, medikuek maskuria gatz-soluzio batekin (%0.9ko kontzentrazioa eta 37°C) bete zuten, DA gertaera batek eragin zezakeen estimulua sortzeko helburuarekin. Prozesu horrek maskuria bete arte iraungo zuen (prozesuaren iraupena aldatu egiten zen pazienteen artean). Azkenik, maskuria pixkanaka hustuz eta kateterra kenduz amaitzen zen esperimendua.

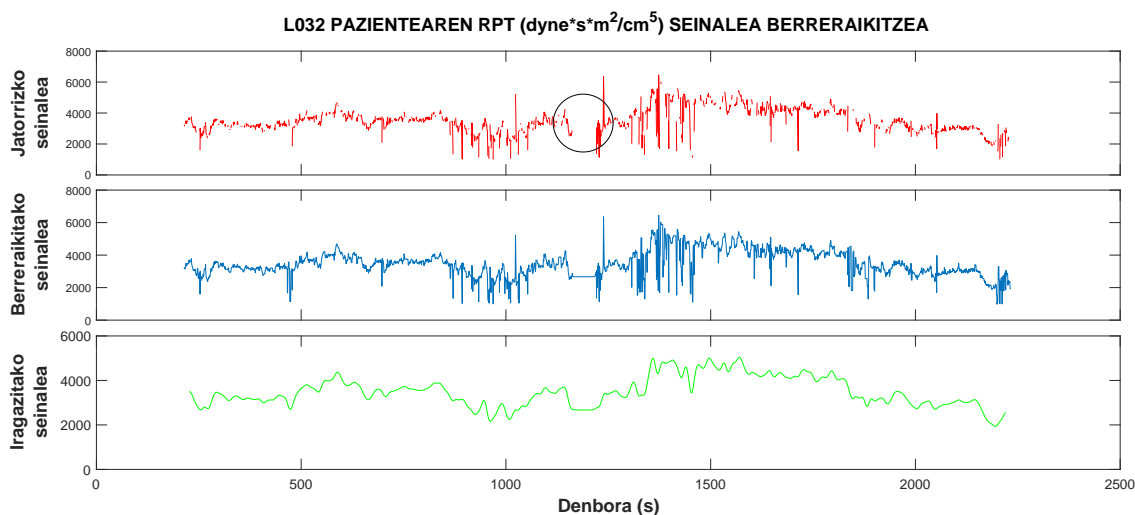
Esperimentuaren hirugarren etapa amaitzeko, pazientea ahoz gorako posizioan egongo litzateke beste 10 minutuz, bere bioseinaleak erregistratzen ziren bitartean. Geroago, mahaia 60°-tara okertuko zen, eta pazientea 10 minutuz egongo zen posizio horretan. Puntu horretan, prozedura eten egiten zen pazienteak sintomak aipatzen bazituen, hala nola zorabioak edo konortea galtzea (sinkopea), edo presio arteriala azkar murrizten zela ikusten bazen. Azken etapa honetako 10 minutuak igarota, klinikoei mahaia 0°-tara okertuko lukete eta esperimenduak pazienteak mahaitik askatuko luke.

### 5.3. Datuak aurreprozesatzea eta seinaleak iragaztea

Datuak biltzeko fasea amaitu ondoren, hurrengo urratsa seinale fisiologikoe-tatik zetorren informazioa prozesatzea izan zen. Lehenik eta behin, bildutako datuen aurreprozesatze bat egin zen, eta ikusi zen denbora-tarte batzuetan neurketa-gailuek ez zutela informaziorik bildu. Mediku-taldeari kontsulta egin ondoren, ondorioztatu zen datu falta hori gailuek berek izan zitzaketan akatsen-gatik izan zela, eta, beraz, irtenbidea galdutako informazioa birkalkulatzea izan zen, lan egiteko informaziorik gabeko denbora-tarterik egon ez zedin. Datuen aurreprozesatze hori 5.2. Irudian ikus daiteke; bertan, adibide gisa, 32. subjektuaren erresistentzia periferiko osoari (RPT) buruzko seinalearen berreraikuntza erakusten da. Seinale gorriak neurtzeko gailuetatik lortutako jatorrizko seinalea adierazten du. Seinale horretan, denbora-tarte batean daturik ez dagoela ikusten da (zirkulu beltz batez markatuta). Seinale urdina informaziorik ez zegoen denbora-tarte horiei buruzko datuak berriro kalkulatu ondoren seinaleari

## 5.4. DA DUTEN PAZIENTEEN DISAUTONOMIA-MAILAREN ANALISI KUANTITATIBOA

dagokio. Datuen aurreprozesatze horretan, balioen kalkulua egin zen informazioziorik gabeko denbora-tartearen aurretik eta ondoren jasotako balioen arteko interpolazio lineal bat aplikatuz.



**5.2. Irudia:** Lagineko subjektuetako baten jatorrizko seinalea aurrez prozesatzea eta iragaztea.

Hurrengo urratsa datuen aurreprozesaketan lortutako seinalea iragaztea izan zen. Aurreko adibidearekin jarraituz, 5.2. Irudian ikusten da seinale berreraikiak (urdinez) jada ez duela informazioziorik gabeko denbora-tarterik, baina zabaltasun handiko tontorrek eta gorabeherak ikusten dira, datuak neurtzeko eta biltzeko prozesuetan dauden zaraten ondorioz. Bihotzeko aldakortasuna eta aurreprozesatutako gainerako seinaleak maiztasun baxukoak direnez, ikerketa-taldeak 0.5 Hz-ko ebaketa-maiztasuneko urrats baxuko iragazki bat erabili zuten neurketa-gailuek eragindako zarata ezabatzeko. Horrela, iragazitako seinalea lortzen da, 5.2. Irudian kolore berdean ikus daitekeen bezala, hori baita ondorengo ataletan kalkulu estatistikoak egiteko erabili zen azken seinalea.

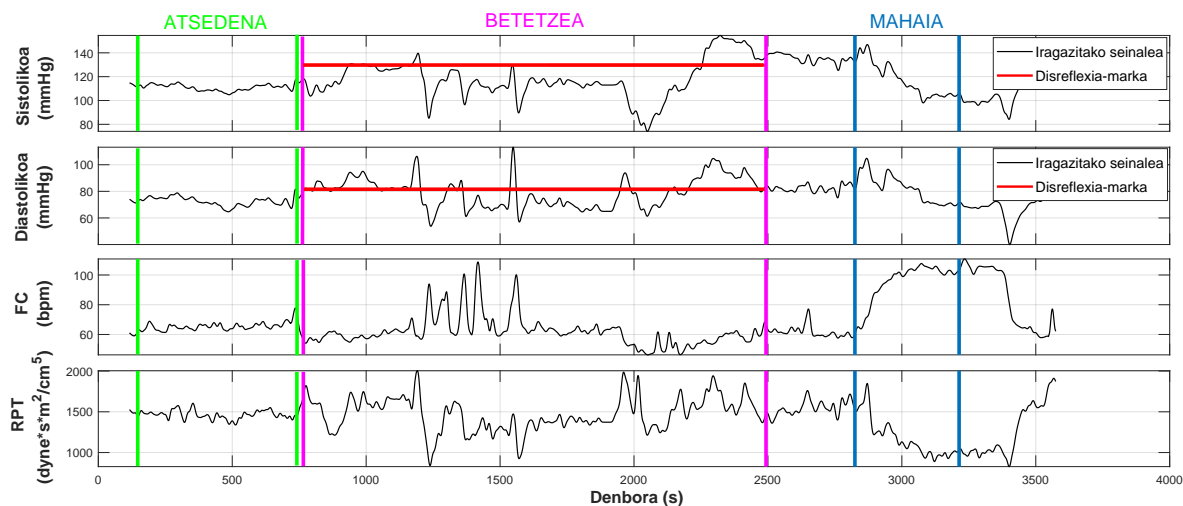
## 5.4. DA duten pazienteen disautonomia-mailaren analisi kuantitatiboa

### 5.4.1. Datuak bistaratzea

Seinaleak aurreprozesatu eta iragazi ondoren, lantaldeak datu-base zabala zuten esperimentazioan zehar jasotako seinaleei buruzko datuekin. Datuak modu errazagoan aztertu ahal izateko, talde medikoak komenigarritzat jo zuten pazienteen seinale bakoitza ikustea eta, horrela, balio horiek prozesu osoan zehar izan zuten bilakaera ulertzea.

## 5. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAK DISREFLEXIAREN DIAGNOSTIKOARI EGINDAKO EKARPENAK

5.3. Irudian, ekipo medikoak bistartzeko eskatu zituen lau seinale fisiologikoen adibide bat agertzen da. Lehenengo bi seinaleak bat datoz presio arterial sistolikoarekin eta diastolikoarekin, hurrenez hurren; hirugarren seinaleak bihotz-maiztasuna adierazten du (FC), eta azkenak erresistentzia periferiko osoa (RPT). Irizpide klinikoaren arabera, bioseinale horien bilakaera ikusteak DAko balizko gertakari bat diagnostikatzea errazten du.

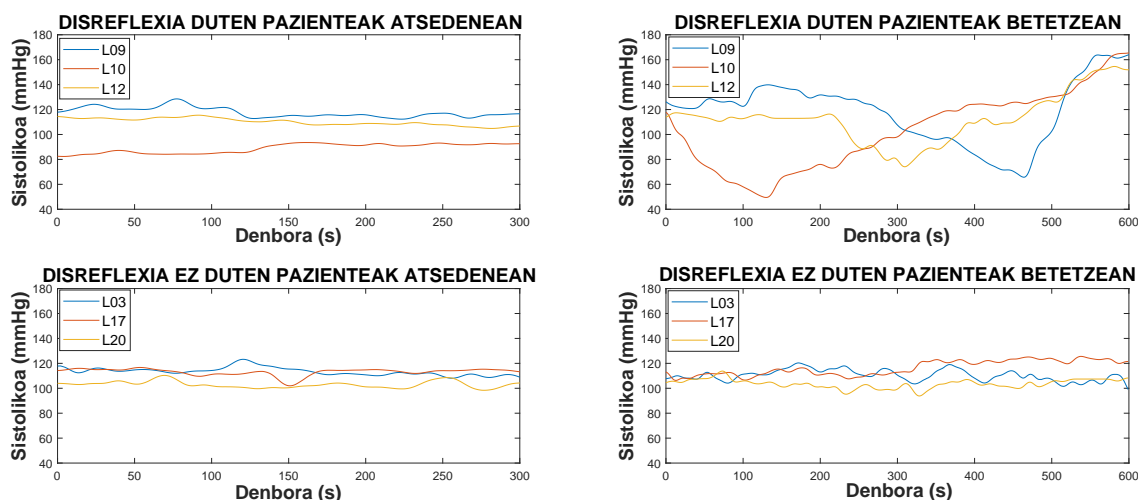


**5.3. Irudia:** Esperimentuaren hirugarren fasean jasotako seinale fisiologikoak bistartzea.

Esperimentazio horretan ere funtsezkoa zen grafiko berean pazienteen seinaleak ikusi ahal izatea. Bistartze horren helburua zen pazienteen seinaleen patroien arteko konparazioa egin ahal izatea esperimentuaren hirugarren faseko atal guztietan. 5.4. Irudiak 6 pazienteren presio arterial sistolikoaren bilakaera erakusten du, bai atseden-zatian, bai maskuria betetzean. Subjektu guztietatik hiruk disreflexia dute (L09, L10, L12), eta besteek (L03, L17, L20) ez dituzte gertakari horiek jasaten. Seinale horiek bistartzeari esker, patologiarik ez dutenengan seinaleen patroia antzekoa ikusten da: seinaleen arteko rangoak ez dira oso ezberdinak atseden-uneetan eta betetze-uneetan. Hala ere, paziente disreflexikoek ere antzeko ereduak dute, eta gorabehera handiak izaten dira maskuria betetzen den unean.



## 5.4. DA DUTEN PAZIENTEEN DISAUTONOMIA-MAILAREN ANALISI KUANTITATIBOIA



**5.4. Irudia:** Presio arterial sistolikoaren bilakaera paziente disreflexikoetan eta patologia hori jasaten ez dutenetan.

### 5.4.2. Datuen analisi estatistikoa

Datu guztiak prozesatu ondoren, hurrengo urratsa lortutako informazioa hainbat estatistika-analisiren mende jartzea izan zen. Horregatik kalkulatu ziren, batetik, aldagai kuantitatiboetarako batezbestekoak eta desbideratze estandarrek, eta, bestetik, aldagai kualitatiboetarako proportzioak. Txi-karratu proba [137] erabili zen aldagai kualitatiboak alderatzeko eta Mann-Whitneyren U proba [138] batezbesteko rangoak alderatzeko. Gainera, korrelazio-analisietarako Rho de Spearman korrelazio-koefizientea [139] kalkulatu zen, estatistikoki esanguratsua diren  $p < 0.05$  balioak kontuan hartuta. Anlisi estatistiko guztiak SPSS v.23 [140] softwarekin egin ziren, eta grafikoak R 3.6.1 eta GraphPad Prism 6. softwareekin sortu ziren.

### 5.4.3. Anlisi kuantitatiboaren emaitzak eta ondorioak

Puntu horretara arte, aurkeztutako lanak DA duen BML bat duten pazienteen huts autonomikoaren irudi orokorra definitzen du. Horretarako, parametro autonomikoak erabiltzen dira, ondoren, taupadaz taupadako monitorizazio hemodinamiko baten bidez neurtutako atsedena luze baten ondoren. Egindako analisi estatistikoaren ondoren, lortutako emaitzak hertsiki medikoak dira, eta, beraz, horien espozizio osoa V. Eranskinean biltzen da. Oro har, nabarmentzekoa da DA duten pazienteek irteera-fluxu sinpatiko txikia erakutsi zutela atsedenean, presio arterialak eta bihotz-maiztasuna konparagarriak zirela atsedenegoera horretan. Termino sinpleetan, gaixotasun hori duten pertsonak nerbio-sistema bat dute, normalean erne eta aktibo mantentzen dena, baina geldoago funtzionatzen duena atsedenean daudenean. Hala eta guztiz ere, bere presio

## 5. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAK DISREFLEXIAREN DIAGNOSTIKOARI EGINDAKO EKARPENAK

---

arteriala eta bihotz-erritmoa egoera horretan lasai eta erlaxatuta dagoen baten antzekoak dira. Irteera-fluxu hori noradrenalinaren maila plasmatico baxuagoek, atsedenean dauden parametro autonomikoen maiztasun baxuen eta altuen erlazio murriztuak (LF/HF) eta barorreflejoaren sentsibilitatea (BRS) areagotzeak neurtzen dute. BRSa batezbesteko presio arterialeko aldaketa-unitate bakoitzeko milisegundoetan (ms) taupaden arteko tartearen aldaketa da.

Egindako esperimentazioak muga batzuk ditu. Lehenik eta behin, proba autonomiko batzuk ezin izan ziren egin, muskulu espiratorioen funtzioa BMLa duten pazienteengan kaltetuta dagoelako. Bigarrenik, ondoriozta daiteke, batetik, pazienteek proba jakin batzuen aurrean zuten ahultasuna eta, bestetik, laginaren tamaina txikia dela-eta, ezin izan zirela parametro autonomikoak mozteko balioak eman, DA duten eta ez duten pazienteak bereizteko. Amaitzeko, azpimarratu behar da taldeak aurkitu zuen arazo handienetako bat izan zela lagineko paziente askoren deserosotasuna maskuria betetzeko orduan, informazioa biltzeko prozesua zailduta. Arazo hori gernu-kateterra sartzeko metodoaren ondorio da, oso inbaditzailea baita.

Hori guztia dela eta, ikertzaile-taldeak lan-ildo bat zehaztu zuen. Ildo horretan, alde batetik, gertakari diserreflexikoen agerpena detektatzeko helburua Ikaskuntza Automatikoan oinarritutako teknikak aplikatzea zen. Horrela, pazienteek garai jaso dezakete tratamendu zuzena, eta patologia horren ondorio potentzialki hilgarriak saihestu ditzakete. Bestalde, esperimentazio honen subjektuen hauskortasuna dela eta, beste helburu nagusi bat metodo ez-inbaditzaileak edo minimoki inbaditzaileak aplikatuz DAren hasierako diagnostiko bat lortzea zen, datuak biltzeko prozesua zailtzen duten eta pazienteak gogaitzen dituzten egoerak saihesteko. Kapitulu honetako hurrengo ataletan, zehatz-mehatz azaltzen da bigarren helburua arrakastaz lantzen den ekarpena.

### 5.5. Disreflexia autonomoaren diagnostiko ez-inbaditzailea egiteko sistema hierarkikoa

DA duten pazienteen disautonomiaren analisi kuantitatiboa osatu ondoren, ikertzaileek ikusi zuten berrikuspen bibliografikoari dagokionez, gaixotasun horri buruzko azterketa gehienak ikuspegi medikotik bideratzen direla. Hala, azterlan ugari azaltzen dute zer den DA eta zer ondorio hilgarri izan ditzakeen. Hala ere, gutxi dira DA ikuspegi teknologiko batetik aztertzen duten lanak, eragin hori automatikoki diagnostikatzeko edo gertaeren agerpena detektatzeko. Suresh eta Duerstocken ikasketez gain [141, 142], DA detektatzeko Ikaskuntza Automatikoko (Machine Learning, ML) teknikak erabiltzen dituen literatura ia ez da existitzen. Suresh eta Duerstock-ek egindako lanak DA gertakariak denbora errealean detektatzera bideratuta daude, aldagai fisiologikoen eta ML tekniken monitorizazioa konbinatzen duen gailu baten bidez.

Ekarpen horrek analisi kuantitatibotik eratorritako ondorioetan proposatutako lan-ildoetako batean iradokitako norabideari jarraitzen dio. Helburua ML-n oinarritutako sistema bat diseinatzea da, BML duten pazienteetan DA

## 5.5. DISREFLEXIA AUTONOMOAREN DIAGNOSTIKO EZ- INBADITZAILEA EGITEKO SISTEMA HIERARKIKOA

---

diagnostikatzeko eta, horrela, hasierako diagnostikoaren arazoari aurre egiteko, eguneroko egoeretan agertzen dela detektatzen saiatu beharrean. Helburu hori lortzeko, ikertzaile-taldeak aurreko ataletan deskribatutako Gurutzetako Unibertsitate Ospitaleko (GUO) langileekin batera egindako azterketan sortutako datu-basea baliatu zen [143].

Gaixotasun horren proba diagnostikoari dagokionez, pazienteek hauskortasun handia dute pairatzen duten lesioagatik. Horregatik, ekarpen horren helburua diagnostikoa urrats bat harago eramatea zen, eta gaixotasuna detektatzeko metodo inbaditzaileak erabiltzeko beharra minimizatzea. Horretarako, diagnostiko-arazoa bi mailatan banatzen zuen sailkapen hierarkikoko sistema bat diseinatzea proposatu zen, gaixotasunaren presentzia zehazteko, modu ez-inbaditzailean atera daitezkeen ezaugarriak soilik erabiliz. Lehen mailarako proposamena pazientearen historial klinikoari buruz eskuragarri zegoen informazioa erabiltzea izan zen. Ondoren, bigarren maila bat proposatu zen lehen mailan argi geratu ez ziren kasuak diagnostikatzeko, esperimentuaren etapa ez-inbaditzaileetatik ateratako ezaugarriak erabiliz (seinale fisiologikoen balioak eta odol-analisen emaitzak). Horren bidez, pazienteei gaixotasuna diagnostikatzeko maskuria betetzeko proba egin behar zitzairen kasuen kopurua minimizatu nahi zen. Gainera, proposatutako sistemak sailkapen-akatsekin lotutako kostuak ere kontuan hartzen ditu. Ondorioz, doitu egin zen negatibo faltsuen (FN) tasa zerora murrizteko, DA duen paziente bat ez diagnostikatzearen ondorio hilgarriak saihestuz.

Laburpen gisa, ekarpen honetan, gaixotasunaren hasierako diagnostikoa MLan eta inbaditzaileak ez diren iturrien ezaugarrietan oinarritutako sistemak erabiliz egin daitezkeen hipotesia planteatzen da. Ondorioz, honako bi helburu hauek finkatu dira azterketarako: gaixotasuna diagnostikatzeko, prozesu ez-inbaditzaileen bidez lortutako informaziotik ateratako ezaugarriak erabiliz, eta diagnostikoa egitean sortutako FN tasa zerora murriztea.

Atal honen gainerako zatia honela antolatzen da: 5.5.1. Azpiatalak gaixotasuna automatikoki detektatzeko erabilitako ezaugarrien erauzketa deskribatzen du. Ondoren, 5.5.2. eta 5.5.3. Azpiataletan, diagnostiko-arazoari ML teknikak aplikatzeko prozesua deskribatzen da, bai eta ekipoa bi mailatako sailkatzaile hierarkikoaren azken proposamenera nola iritsi zen ere. Azkenik, 5.5.4. Azpiatalean, azterlanean zehar lortutako emaitzak komentatzen dira, eta lan horretatik eratorritako ondorioak eta etorkizuneko ildoak aurkezten dira.

### 5.5.1. Ezaugarriak ateratzea

Datuak bildu ondoren, 5.2. Atalean xehetasunez azalduta, hurrengo urrats naturala bildutako informazioa aztertzea izan zen. Azpiatal honetan datu-base berri bat aurkezten da, esperimentazio-fasean bildutako informaziotik ateratako ezaugarri desberdinekin sortua, ikus 5.1. Irudia. Datu-base hori gero erabiliko litzateke ML sistema bat entrenatzeko, DA diagnostikatzeko helburuarekin. Puntu honetara iritsita, azpimarratu behar da datu-base hau sortzeko analisi kuantitatiboan erabilitako lagineko 8 pazienteren erregistroak baztertu zirela. Izan ere, hainbat arrazoiengatik, paziente horien probak eten egin behar izan

## 5. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAK DISREFLEXIAREN DIAGNOSTIKOARI EGINDAKO EKARPENAK

ziren esperimentuaren unerren batean. Beraz, baztertu egin behar izan ziren, haien erregistroak osatu gabe daudelako.

5.5. Atal honen hasieran aipatzen den bezala, ekarpen honen helburu nagusietako bat da BML duten pazienteetan DA diagnostikatzea, maskuri-betetzea bezalako metodo inbaditzaileak aplikatu behar izan gabe. Paziente horien hauskortasuna dela eta, ekipoak esperimentuaren zati ez-inbaditzaileetatik ateratako ezaugarriak soilik erabiltzea erabaki zuen, eta maskuri-betetzearen zatitik lortutako informazioa baztertu zuen. Guztira 35 izan ziren metodo ez-inbaditzaileak erabiliz ateratako ezaugarriak, eta hiru taldetan banatu ziren. Alde batetik, 5.1. Taulak pazientearen historia klinikoari dagozkion 5 ezaugarriek osatzen duten lehen taldea aurkezten du.

**5.1. Taula:** Pazienteen historial klinikotik ateratako ezaugarriak.

Ezaugarria	Definizioa	Mota
TYPE_INJ	Lesio mota	Bitarra
INJ_LEVEL	BMLren maila	Ordinala (20 kategoria)
ASIA [35, 144]	Mugimen- eta zentzumen-funtziorik ezaren edo zaintzaren araberako sailkapena	Ordinala (5 kategoria)
SPHINCTER	Esfinterraren funtzionamendua	Nominala (5 kategoria)
PREV_SYMPT	Aurretiko sintomatologia	Bitarra

Bestalde, bigarren taldeak odol-ateratze bien hormona-mailei dagozkien 8 ezaugarriak ditu, 5.2. Taulan erakutsiak.

**5.2. Taula:** Esperimentuaren hormona-zati (odol-analitika) ez-inbaditzailearen jatorri fisiologikoko ezaugarriak.

Ezaugarria	Definizioa
VASOP_BASAL	Basopresinaren basal balioa atsedeen-posizioan.
AD_BASAL	Adrenalinaren basal balioa atsedeen-posizioan.
NA_BASAL	Noradrenalinaren basal balioa atsedeen-posizioan.
DOP_BASAL	Dopaminaren basal balioa atsedeen-posizioan.
DIV_VASOP_BIPE	Basalarekiko 60 <sup>o</sup> -ko basopresinaren balioa.
DIV_AD_BIPE	Basalarekiko 60 <sup>o</sup> -ko adrenalinaren balioa.
DIV_NA_BIPE	Basalarekiko 60 <sup>o</sup> -ko noradrenalinaren balioa.
DIV_DOP_BIPE	Basalarekiko 60 <sup>o</sup> -ko dopaminaren balioa.

Amaitzeko, hirugarren taldea 22 ezaugarriek osatzen dute. Ezaugarri horiek 5.3. Taulan agertzen dira, eta pazienteak mahai kulunkarian zeudela jasotako lau seinale fisiologikoetatik atera ziren. 22etatik lehen 4ak pazienteak ahoz gora-

5.5. DISREFLEXIA AUTONOMOAREN DIAGNOSTIKO EZ-  
INBADITZAILEA EGITEKO SISTEMA HIERARKIKOA

ko posizioan ( $0^\circ$ ) etzanda zeuden esperimentuaren zatitik lortu ziren bitartean, azken 18ak pazientearekin erregistratutako seinaleetatik atera ziren  $60^\circ$ -ko inklinazioan.

**5.3. Taula:** Esperimentuko bioseinaleak biltzeko zati ez-inbaditzailearen jatorri fisiologikoko ezaugarriak.

Ezaugarria	Definizioa
SYS_BASAL	Atsedeen-posizioan dagoen odol-presio sistolikoaren basal balioa.
DIA_BASAL	Atsedeen-posizioan dagoen odol-presio diastolikoaren basal balioa.
HR_BASAL	Atsedeen-posizioan dagoen bihotz-maiztasunaren basal balioa.
TPR_BASAL	Atsedeen-posizioan dagoen erresistentzia periferiko osoaren basal balioa.
DIV_SYS_TILT_3min	Odol-presio sistolikoa, mahaia $60^\circ$ okertu eta 3 minutura, bere balio basalarekiko.
DIV_SYS_TILT_10min	Odol-presio sistolikoa, mahaia $60^\circ$ okertu eta 10 minutura, bere balio basalarekiko.
DIV_SYS_TILT_MIN	Odol-presio sistolikoaren balio minimoa, mahaiaren $60^\circ$ -ko inklinazio-proban, bere balio basalarekiko.
TIME_SYS_TILT_MIN	Mahaiaren $60^\circ$ -ko inklinazio-proban odol-presio sistolikoaren balio minimoa lortzeko igarotako denbora.
DIV_DIA_TILT_3min	Odol-presio diastolikoa, mahaia $60^\circ$ okertu eta 3 minutura, bere balio basalarekiko.
DIV_DIA_TILT_10min	Odol-presio diastolikoa, mahaia $60^\circ$ okertu eta 10 minutura, bere balio basalarekiko.
DIV_DIA_TILT_MIN	Odol-presio diastolikoaren balio minimoa, mahaiaren $60^\circ$ -ko inklinazio-proban, bere balio basalarekiko.
TIME_DIA_TILT_MIN	Mahaiaren $60^\circ$ -ko inklinazio-proban odol-presio diastolikoaren balio minimoa lortzeko igarotako denbora.
DIV_HR_TILT_3min	Bihotz-maiztasuna, mahaia $60^\circ$ okertu eta 3 minutura, bere balio basalarekiko.
DIV_HR_TILT_10min	Bihotz-maiztasuna, mahaia $60^\circ$ okertu eta 10 minutura, bere balio basalarekiko.
DIV_HR_TILT_MAX	Bihotz-maiztasunaren balio maximoa, mahaiaren $60^\circ$ -ko inklinazio-proban, bere balio basalarekiko.
TIME_HR_TILT_MAX	Mahaiaren $60^\circ$ -ko inklinazio-proban bihotz-maiztasunaren balio maximoa lortzeko igarotako denbora.

## 5. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAK DISREFLEXIAREN DIAGNOSTIKOARI EGINDAKO EKARPENAK

Ezaugarria	Definizioa
DIV_HR_TILT_MIN	Bihotz-maiztasunaren balio minimoa, mahaiaren 60°-ko inklinazio-proban, bere balio basalarekiko.
TIME_HR_TILT_MIN	Mahaiaren 60°-ko inklinazio-proban bihotz-maiztasunaren balio minimoa lortzeko igarotako denbora.
DIV_TPR_TILT_3min	Erresistentzia periferiko osoa, mahaia 60° okertu eta 3 minutura, bere balio basalarekiko.
DIV_TPR_TILT_10min	Erresistentzia periferiko osoa, mahaia 60° okertu eta 10 minutura, bere balio basalarekiko.
DIV_TPR_TILT_MIN	Erresistentzia periferiko osoaren balio minimoa, mahaiaren 60°-ko inklinazio-proban, bere balio basalarekiko.
TIME_TPR_TILT_MIN	Mahaiaren 60°-ko inklinazio-proban erresistentzia periferiko osoaren balio minimoa lortzeko igarotako denbora.

Azken batean, taldeak jatorri ez-inbaditzaileko 35 ezaugarri osatutako datu-basea sortu zuen: historia klinikoko 5 ezaugarri, odol-analisietako 8 ezaugarri eta esperimentazioan zehar jasotako seinale fisiologikoetako 22 ezaugarri.

Datu-basea sortu ondoren, ikertzaileek aztertu egin zuten eta konturatu ziren paziente batzuen kasuan maskuria betetzeko eta mahaia inklinatzeko etapekin lotutako datuak falta zirela. Balio horien gabezia probak egiteko ezintasunaren ondorio izan zen, bradikardiak, zorabioak eta beste arazo batzuk zirela eta. Datu gabezia horrek datu horiek galtzea baino esanahi sakonagoa zuen. Ildo horretan, ikertzaileek kontuan hartu zuten baliorik ezak semantika bat izan zezakeela sailkapena egiterakoan, eta datuak [0.25-1] tartean normalizatzea eta datuak biltzea ezinezkoa izan zen kasuetarako 0 balioa gordetzea erabaki zuten. Helburu horrekin, datuen balio ez-galdu guztiak desplazatu eta normalizatu egin ziren 5.1 ekuazio linealaren arabera. Ekuazio horretan,  $X_i$ -k ezaugarrien bektorearen  $i$ -balioa adierazten du,  $X_{norm}$ -k balio normalizatua eta  $X_{max}$ -k eta  $X_{min}$ -k ezaugarri horrek erregistro osoan dituen balio maximo eta minimoak adierazten dituzte. Urrats horien ondorioz, ezaugarri bakoitza bektore batek irudikatzen zuen. Bektore horren 0 balioek esanahiarekin falta ziren datuak adierazten zituzten, hala nola proba ezin bukatzea, gainerakoak [0.25-1] tartean zeuden bitartean.

$$X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (5.1)$$

### 5.5.2. Sailkapen-tresnaren konfigurazio esperimentalak

Datu-basea normalizatuta, hurrengo urratsa datu horiek ML-ren analisi bat egitea izan zen, DA automatikoki diagnostikatzeko sistema bat eraikitzeke. Helburu hori lortzeko, algoritmo motak eta sailkapen-egiturak aztertu eta horietako bakoitzarekin lortutako emaitzak analizatu behar izan ziren.

Horrela, Gainbegiratutako Ikaskuntzako algoritmo desberdinak entrenatu ziren, aurretik 4.3. Atalean deskribatutakoak, Weka software-plataformaren [145] konfigurazio estandarra erabiliz. Artearen egoeraren paradigma mota desberdinei dagozkien algoritmoak hautatu ziren, hala nola arauetan edo distantzietan oinarritutako algoritmoak, probabilitate-metodoetan oinarritutako algoritmoak edo sailkapen-sistema anitzak. Guztira 11 algoritmo entrenatu ziren, Wekak lehenespenez bakoitzarentzat dituen balioak erabiliz: Decision Tree (DT), Random Forest (RF), AdaBoost (AdaB), Bagging (Bag), Logistic Regression (LR), k-Nearest Neighbours (k-NN), Support Vector Machines (SVM), One Rule (1R), Radial-Basis Network (RBF), Naïve Bayes (NB) eta Multilayer Perceptron (MLP).

Hurrengo atalean, azken soluziora iritsi arte jarraitutako ikuspegi guztietatik lortutako emaitzak aurkezten dira. Datu-basearen tamaina txikia dela eta, hurrengo ataleko emaitza guztiak lortzeko, bat kanpoan uzteko baliozkotze-metodologia erabili zen (leave-one-out).

### 5.5.3. Emaitzak

Atal honetan, BML duten pazienteetan DAren presentzia diagnostikatzeko diseinatu zen sailkapen-sistemaren emaitzak aurkezten dira. Horretarako, iker-tzaileek teknika ez-inbaditzaileen bidez pazienteei atera ahal izan zitzaizkien ezaugarriak erabili zituzten. Jarraian, arazo horri aurre egiteko aztertu diren ikuspegiak zehazten dira, ezaugarri horien azpiespazioak modu independentean eta konbinatuan aztertuz. Azterketa horren ondoren, bi mailako diagnostiko hierarkikoko sistema bat aurkezten da eta haren emaitzak BML duten pazienteetan DA detektatzean erakusten dira.

#### Ezaugarri klinikoaren azpiespazioa

Lehenengo ahalegina izan zen ea posible zen DA historial klinikoaren ezaugarriei soilik ML teknikak aplikatuz detektatzea, horiek baitira proban zehar lortutako guztietatik gutxien inbaditzen dutenak. Ildo horretan, DA ezaugarri horiek bakarrik erabiliz detektatu ahal izango balitz, baliteke pazientearekin esperimentaziorik egin beharrik ez izatea gaixotasuna diagnostikatzeko, medikuek hala erabakiko balute.

5.4. Taulak arazoaren lehen ikuspegi honetan 5 ezaugarri ez-inbaditzaile klinikoak 11 sailkapen-algoritmoekin erabiltzearen emaitzak aurkezten ditu.

## 5. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAK DISREFLEXIAREN DIAGNOSTIKOARI EGINDAKO EKARPENAK

**5.4. Taula:** Saillatzaile onena zenbatestea historial klinikoaren ezaugarrien azpiespazioa erabilia.

	1R	DT	kNN	NB	RBF	SVM
<b>Zehaztasuna</b>	79.31	79.31	<b>86.21</b>	86.21	82.76	82.76
<b>0 klaseko akatsa (FP)</b>	4	4	<b>3</b>	1	1	3
<b>1 klaseko akatsa (FN)</b>	2	2	<b>1</b>	3	4	2

	LR	AdaB	Bag	RF	MLP
<b>Zehaztasuna</b>	89.66	79.31	79.31	82.76	89.66
<b>0 klaseko akatsa (FP)</b>	1	4	4	3	1
<b>1 klaseko akatsa (FN)</b>	2	2	2	2	2

5.4. Taularen emaitzek erakusten dute posible dela kasu kopuru handi bat zuzen detektatzea, soilik historial klinikotik datozen ezaugarriak erabiliz. LR eta MLP algoritmoek zehaztasun onena lortu zuten, baina, hala ere, biek negatibo faltsuen (FN) 2 errore eragin zituzten. 5.5. Atalean adierazi den bezala, DA gertakarien ondorio hilgarriak kontuan hartzen badira, horrelako erroreak saihestu egin behar dira, kostu handia baitu pazienteen osasunean. Horrela, FN kantitatea minimizatu nahi denean, k-NNk lortu zuen emaitzarik onena, eta horregatik ezarri da algoritmo onena, nahiz eta zehaztasun handiena ez izan.

Hala ere, algoritmoetako batek ere ez zituenez zehaztutako helburuak bete, esperimentazioa errepikatzea erabaki zen, metodo ez-inbaditzaileak aplikatuz bildutako ezaugarri fisiologikoen azpiespaziora aldatuz.

### Ezaugarri fisiologiko ez-inbaditzaileen azpiespazioa

Saillapenean gertatutako FN erroreak ezabatzeko beharraren aurrean, estrategia aldatu zen eta arazoari aurre egiteko, esperimentuaren zati ez-inbaditzailearen datu fisiologikoetatik ateratako 30 ezaugarrien azpiespazioa aztertu zen, ikus 5.2. eta 5.3. Taula. Kasu horretan, pazienteek gutxieneko proba inbaditzaileak egin beharko lituzkete, ohiko mediku-azterketetan egin daitezkeen oso beste-lakoak ez direnak.

Aurreko ikuspegiko metodologiarekin jarraituz, bigarren azpiespazio hori aztertzeko aurreko kasuan erabili ziren Gainbegiratutako Ikaskuntzako 11 algoritmoak erabili ziren, eta jarraian 5.5. Taulan agertzen diren emaitzak lortu ziren.

5.5. Taulan erakutsitako emaitzak ikusita, ikusten da zehaztasunak okerragoak direla ezaugarri klinikoaren azpiespazioan lortutakoak baino. NB algoritmoa da emaitzarik onena lortzen duena, bai zehaztasunari dagokionez (%82.76), bai FNren kopuru txikiari dagokionez (FN = 3). Hala ere, lortutako emaitzak txarrak ez diren arren, ez da betetzen FN ez sortzeko helburua, eta, beraz, baztertu egin da azpiespazio hori erabiltzea DAren agerpena diagnostikatzeko.



5.5. DISREFLEXIA AUTONOMOAREN DIAGNOSTIKO EZ-  
INBADITZAILEA EGITEKO SISTEMA HIERARKIKOA

**5.5. Taula:** Sailkatzailerik onena zenbatestea metodo ez-inbaditzaileen bidez ateratako ezaugarri fisiologikoen azpiespazioa erabilita.

	1R	DT	kNN	NB	RBF	SVM
Zehaztasuna	55.17	62.07	79.31	<b>82.76</b>	79.31	68.97
0 klaseko akatsa (FP)	6	6	2	<b>2</b>	3	5
1 klaseko akatsa (FN)	7	5	4	<b>3</b>	3	4

	LR	AdaB	Bag	RF	MLP
Zehaztasuna	62.07	62.07	58.62	58.62	68.97
0 klaseko akatsa (FP)	3	5	8	7	3
1 klaseko akatsa (FN)	8	6	4	5	6

**Ezaugarri kliniko eta fisiologiko ez-inbaditzaileen azpiespazio konbinatua**

Aurreko bi saiakeretan frogatu den bezala, ez zen bete FNak ezabatzeko helburua. Horregatik, ikuspegi horretan, ikertzaileek pazienteen historial klinikoetatik datozen ezaugarriak nahiz metodo ez-inbaditzaileekin bildutako ezaugarri fisiologikoak erabili zituzten. 5.6. Taulak 35 ezaugarri ez-inbaditzaileen (klinikoak eta fisiologikoak) erabileraren emaitzak aurkezten ditu, 11 sailkapen-algoritmoekin.

**5.6. Taula:** Sailkatzailerik onena zenbatestea ezaugarri kliniko eta fisiologiko ez-inbaditzaileen azpiespazio konbinatua erabilita.

	1R	DT	kNN	NB	RBF	SVM
Zehaztasuna	55.17	68.97	<b>79.31</b>	86.21	82.76	82.76
0 klaseko akatsa (FP)	6	4	<b>4</b>	1	2	2
1 klaseko akatsa (FN)	7	5	<b>2</b>	3	3	3

	LR	AdaB	Bag	RF	MLP
Zehaztasuna	75.86	75.86	75.86	75.86	72.41
0 klaseko akatsa (FP)	2	4	4	4	3
1 klaseko akatsa (FN)	5	3	3	3	5

5.6. Taulak erakusten duenez, zehaztasun-tasak ezaugarri fisiologikoen azpiespazioa erabiliz lortutakoak baino handiagoak dira, eta azpiespazio klinikoan lortutakoan antzekoak. NB algoritmoak lortu zuen zehaztasun handiena, eta

## 5. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAK DISREFLEXIAREN DIAGNOSTIKOARI EGINDAKO EKARPENAK

---

RBF eta SVM izan ziren ondoren. Hala ere, garrantzitsua da azpimarratzea horiek guztiek FNren 3 akats egin zituztela. Horregatik, nahiz eta zehaztasun handieneko algoritmoa ez izan, kNN hautatu zen emaitzarik onenak emanda-koan, FNak 3tik 2ra murriztea lortu baitzuen.

### Sailkapen hierarkikoko sistema

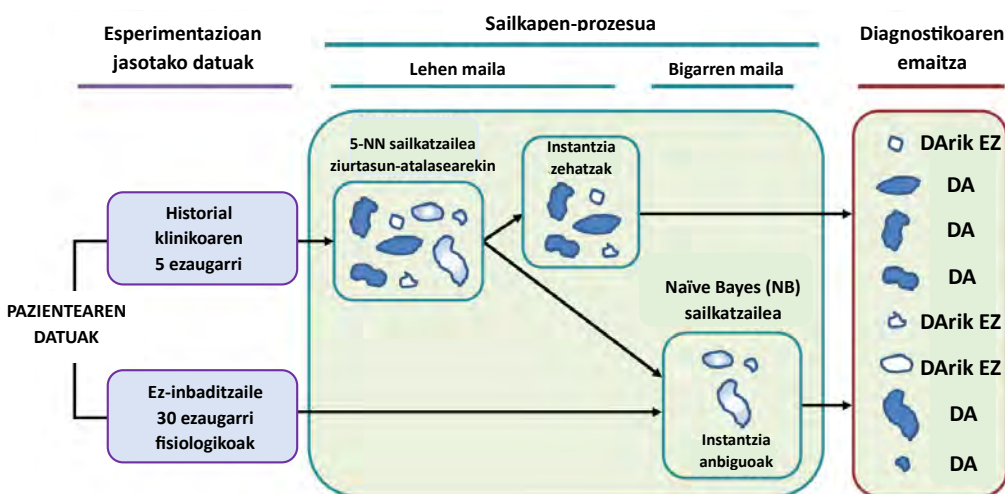
Aurreko hiru saiakerek baieztatu zuten ezinezkoa dela automatikoki diagnostikatzea DA, sailkapen-arazoari maila bakar batean helduz. Hori dela eta, gaixotasuna bi mailatan diagnostikatzea proposatzen zuen estrategia berri bat planteatu zen, azpiespazio bakoitzaren potentziala eta sailkapena egiteko haien arteko osagarritasuna aprobeztatuz.

Lehen mailan historia klinikoaren ezaugarriekin bakarrik lan egin zen DA diagnostikatzeke. Lehen maila horrek kasu argiak sailkatzeke balioko luke, eta sailkapen sendorik lortuko ez luketen erabaki-mugetatik hurbil daudenak anbiguotzat hartuko lituzke. Lehen mailan lortutako kasu ez oso argietarako, bigarren maila bat proposatu zen, ezaugarri fisiologiko ez-inbaditzaileen azpiespazioa erabiliz kasu horien azken klasea zehazteke. Bi azpiespazioen miaketa, ordena horretan, bat dator pazienteei esperimendazio horren probak egiteko beharra minimizatzeke eta diagnostikoaren inbasibitatea ahalik eta gehien murrizteko helburuekin.

Jarraitu beharreko estrategia planteatu ondoren, ikertzaileek 5.4. eta 5.5. Taulen emaitzetan oinarritu ziren maila bakoitzeko algoritmo onenak hautatzeke. Horrela, sailkatzaile hierarkikoaren lehen mailak k-NN algoritmoa erabiliko luke eta bigarrenak NB. Hala ere, aurreko esperimendazioak frogatu zuen ezinezkoa izan zela FN kopurua zerora murriztea. Beraz, arazo hori saihesteko, politika kontserbadorea aplikatu zitzaion lehen mailako sailkatzaileari, eta ziurtasun-murrizketa ezarri zen maila horretan sailkatzeke. Horrela, sailkatzaileak instantzia baten klasea zehaztuko luke, baldin eta gutxienez ondoko 5 partoietatik 4 klase berekoak balira. Aitzitik, instantzia anbigua izango litzateke lehen sailkatzailearen ziurtasuna ahulagoa denean, eta bigarren mailako sailkatzaileak erabakiko luke, azkenean, pazientea gaixotasunarekin diagnostikatzen den ezaugarri fisiologiko ez-inbaditzaileak erabiliz. 5.5. Irudiaren diagramak proposatutako sistema hierarkikoaren funtzionamendu-eskema erakusten du.

Aurreko kasuetan bezala, taldeak 11 algoritmoekin probatu zuen sistema, beste behin ere azterketa osoan erabilitako leave-one-out metodologia erabiliz. 5.7. Taulan esperimendazio horren emaitzak agertzen dira, eta, azkenean, FNren sailkapen askea lortu ahal izan zen. Batetik, frogatzen da lehen mailan k-NN algoritmoak 29 kasutatik 21 zuzen sailkatu zituela, 1ean huts egin zuela eta 7 anbiguotzat jo zituela. Bestalde, bigarren mailan, NB algoritmoak zuzen katalogatu zituen lehen sailkatzaileak anbiguo gisa markatutako 7 kasuetatik 6. Horrela, proposatutako sistema hierarkikoak %93.10eko zehaztasuna lortu zuen.

## 5.5. DISREFLEXIA AUTONOMOAREN DIAGNOSTIKO EZ- INBADITZAILEA EGITEKO SISTEMA HIERARKIKOA



**5.5. Irudia:** Proposatutako saikapen hierarkikoko sistemaren egitura.

**5.7. Taula:** Bi mailatako saikatzaille hierarkikoaren ebaluazioa.

		1. maila: ezaugarri klinikoak 5-NN 4/5eko ziurtasun-atalasearekin	2. maila: ezaugarri fisiologikoak NB	Guztira
DA EZ klasea: 8 paziente	Arrakasta	1	5	6
	Akatsa	1	1	2
	Anbigua	6	0	-
DA klasea: 21 paziente	Anbigua	1	0	-
	Akatsa	0	0	0
	Arrakasta	20	1	21

Saikapen hierarkiko horren emaitzak erraz ulertzeko, 5.8. Taulak modu bisualagoan erakusten ditu behar bezala sailkatu ahal izan ziren instantziak (berdez), bai lehen mailan, bai bigarrenean. Gainera, 5.8. Taulak lehen mailako saikatzailan (laranjaz) anbiguo geratu ziren kasuak ere erakusten ditu. Sistemak ezin izan zituen pazienteetako bi behar bezala sailkatu (gorriz), eta FPko bi akats sortu zituen. Nabarmendu behar da akats mota horren ondorioak ez direla hain larriak, esan nahiko lukeelako pazienteak esperimentuko maskuria betetzeko zati inbaditzailetik igaro beharko lukeela, eta, ondorioz, medikuak ohartuko lirakeke pazienteak ez zuela gaixotasuna. Maskuria betetzeko probak ez dakarrenez inolako arriskurik pazientearentzat, horrelako akatsak sortzearen kostu bakarra da pazienteak saihestu zitekeen proba bat egingo zuela.

## 5. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAK DISREFLEXIAREN DIAGNOSTIKOARI EGINDAKO EKARPENAK

**5.8. Taula:** Leave-one-out metodologia erabiliz sailkatzaile hierarkikoaren emaitzak. Parentesi arteko ziurtasunak [0-1] tartean daude.

Paziente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Klasea:</b>										
0-Darik Ez / 1-DA	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>1. mailako sailkatzailea:</b>										
Iragarritako klasea:	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ziurtasuna:	(1)	(0.6)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
<b>2. mailako sailkatzailea:</b>										
Iragarritako klasea:	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Ziurtasuna:	-	(1)	-	-	-	-	-	-	-	-
Paziente	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>Klasea:</b>										
0-Darik Ez / 1-DA	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
<b>1. mailako sailkatzailea:</b>										
Iragarritako klasea:	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1
Ziurtasuna:	(1)	(0.6)	(0.6)	(1)	(0.6)	(0.6)	(0.8)	(1)	(1)	(1)
<b>2. mailako sailkatzailea:</b>										
Iragarritako klasea:	-	0	0	-	0	1	-	-	-	-
Ziurtasuna:	-	(1)	(1)	-	(1)	(1)	-	-	-	-
Paziente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
<b>Klasea:</b>										
0-Darik Ez / 1-DA	1	1	1	0	1	1	0	1	1	
<b>1. mailako sailkatzailea:</b>										
Iragarritako klasea:	1	1	1	0	1	1	1	1	0	
Ziurtasuna:	(1)	(1)	(1)	(0.6)	(1)	(1)	(1)	(1)	(0.6)	
<b>2. mailako sailkatzailea:</b>										
Iragarritako klasea:	-	-	-	0	-	-	-	-	1	
Ziurtasuna:	-	-	-	(1)	-	-	-	-	(1)	

### 5.5.4. Ondorioak

Ekarpen honetan aurkeztutako edukiaren arabera, egindako lanaren ekarpenak honako hauek izango lirateke: batetik, DAko gertakariak hautemateari buruzko egungo bibliografia aberastea, Ikaskuntza Automatikoko tekniken bidez. Eta, beste aldetik, arlo horretan lan egiten duten klinikoei euskarria ematea.

Lehenik eta behin, 5.5. Atal honen hasieran egiaztatu den bezala, lan honek ikuspegi teknologikoak urriak diren arlo batean laguntzen du, aurkitutako bibliografia gehiena patologia horren eta haren ondorioen deskribapenean zentratzen baita. Hala ere, ia ez dago DA gertaerak ikuspuntu teknologikotik detektatzeko lanik. Izan ere, literatura zientifikoan ez dago ikerketa honetan sortu den datu-base konparagarririk.

## 5.5. DISREFLEXIA AUTONOMOAREN DIAGNOSTIKO EZ- INBADITZAILEA EGITEKO SISTEMA HIERARKIKOA

---

Bigarrenik, lan horrek Gurutzetako Unibertsitate Ospitaleko klinikoen onarpena jaso zuen, DA diagnostikatzeko arazo konplexuaren aurrean irtenbide bat proposatu baitzuen. Konponbide hori irizpide medikoaren arabera zehaztutako bi helburuetara egokitu zen: FN tasa zerora murriztea eta inbasibitatea eta proba klinikoak egiteko beharra minimizatzea. Hori lortu zen inbaditzaileak ez diren iturrietatik (historial klinikoa eta jatorri fisiologikoko datuak, esaterako) ateratako informazioaren erabilerari esker.

Lortutako emaitzak arrakastatsuak izan arren, ikerketa-taldeak etorkizuneko bi lan-ildo aurreikusi zituen. Lehenengoa azterketa-lagina handitzean oinarritzen zen; izan ere, esperimentazioan erabilitako 29 pazienteko lagina txikia izan zitekeen emaitzak populazio zabalago batera orokortzeko. Bigarrena propietate esplikatzaileak dituzten sailkatzaileen erabileran zentratu zen, proposatutako sistema hierarkikoak klase bat zergatik aukeratu zuten ez azaltzeko ahultasuna baitu. Horrela, sailkapena sendoa eta ez-inbaditzailea izateaz gain, klinikoei azalpen bat emango lieke erabaki diagnostiko bat hartzeko.

5. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAK DISREFLEXIAREN  
DIAGNOSTIKOARI EGINDAKO EKARPENAK

---

## 6. Kapitulua

# Ikaskuntza Automatikoaren ekarpenak egoera emozionalak detektatzeko

### 6.1. Hitzaurrea

Azken urteotan, osasunaren kontzepzioak, Osasunaren Mundu Erakundeak (OME) definitzen duen bezala [146], aldaketa nabarmena izan du pertsonen ongizate fisikoa eta emozionala txertatzean, soilik gaixotasunik ezera mugatu beharrean. Bilakaera horren ondorioz, osasun-sistemek teknologia berriak behar dituzte, diagnostiko-prozesua optimizatzeko eta gaixotasunak hautematearekin lotutako kostuak murrizteko. Testuinguru horretan, konputazio fisiologikoan espezializatutako ikertzaileek pazienteen seinale fisiologikoetan patrioiak identifikatzeko gai diren sistema informatikoak diseinatu dituzte, eta, horri esker, diagnostikoak egin eta haien egoera emozionalari buruzko informazioa eman dezakete. Ikerketa-talde askok landu dute estresaren eta osasun mentalararen arteko harremana [147–149]. Ikerketa horiek garrantzi berezia hartu dute, COVID-19aren pandemiari lotutako estres-mailak eta buruko nahasmenduen intzidentziak nabarmen gora egin dutelako [150, 151]; beraz, estresaren detekzio goiztiarra interes handiko gaia da oraindik komunitate zientifikoan [152–154].

Joera horri jarraituz, egoera estresagarriek edo lasaigarriek organismoan eragiten duten zuzeneko inpaktuan oinarritzen da ekarpen hori, eta nerbio-sistema autonomoan (NSA) islatzen da. NSAk sentzibilitate handia du, eta erantzun fisiologikoetan desberdintasunak identifika ditzake, pertsona bat estres-egoera batean erlaxatuta dagoenean, giro lasai bati kontrajarrita.

Lehenago, ikerketa-talde horrek algoritmo bat garatu zuen estres-maila desberdinak detektatzeko eta sailkatzeko, bi seinale fisiologikotan oinarrituta [155]: elektrokardiogramaren RR seinalea (EKG) eta jarduera elektrodermiko (EDA), hurrenez hurren 3.2. eta 3.4. Ataletan azalduta.

## 6. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAREN EKARPENAK EGOERA EMOZIONALAK DETEKTATZEKO

---

Duela gutxi, ikertzaileek argitu zuten algoritmo batek organismoaren erlaxazio-erantzunak (RRespak) detekta ditzakeela pertsona baten EDA bakarrik monitorizatzean [156]. Azterlan honen helburua RRespen egoera mentalak detektatzea da, eta hiru motatan sailkatzen dira: erlaxazioa estresean, erlaxazioa atsedenean eta erlaxazio jarraitua. Horretarako, aldaketak egin ziren aurretiko sistematan [156], RR seinaletik eratorritako ezaugarri berriak gehituz eta parte-hartzaileen estres eta erlaxazio egoerak eragiten zituen esperimendu batetik ateratako seinaleak erabiliz.

Erlaxazio-erantzunak ematen direnean, egoera mentala ezagutzea baliagarria izan daiteke terapia eta teknologia espezifikotik, pazientearekiko egokitzapena ebaluatzeko [157]. Gainera, izaera neurofisiologikoko proba diagnostiko batzuetan [38, 158], funtsezkoa da RRespetan pazientearen egoera mentala ezagutzea, emaitza zehatzak bermatzeko; izan ere, probaren ulean balio fisiologiko basalak pazientearen testuinguru mentalak alboratu ditzake.

Ekarpen horren egitura honako hau da: 6.2. Atalean, datuak biltzeko prozesua zehazten da, EDA eta RR seinaleak lortzeko prozeduraren konfigurazio esperimentalaren barne, baita aurreprozesua eta ezaugarrien erauzketa ere, ondoren aztertzeko. Horren ostean, 6.3. Atalak sailkatzailearen diseinua jorratzen du pazienteen egoera mentala zehazteko haien RRespak momentuetan, algoritmoaren errendimenduaren ebaluazio batekin eta hiru egoera mentalak bereizteko esperimenduan ateratako ezaugarrien analisi batekin. Gainera, lortutako irtenbiderik onena erreferentziako datu-multzo bat erabiliz probatzen da. 6.4. Atalean, emaitza positiboak sortuz tresna aplikatu daitezkeen eremuak aztertzen dira. Azkenik, 6.5. Atalean ondorioak aurkezten dira eta etorkizuneko ikerketa-ildoak proposatzen dira.

## 6.2. Datu-bilketa

Sarreran aipatzen den bezala, atal hau bi azpiataletan banatzen da. Lehenengoak ikertzaile-taldeak egindako esperimendua deskribatzen du; bigarrenak, berriz, hainbat ezaugarri-motaren erauzketa-prozesua du ardatz, ondoren aztertzeko.

### 6.2.1. Konfigurazio esperimentalak

Ikertzaileek esperimendu bat egin zuten egoera estresagarriak eta lasaigarriak sortzeko Bilboko Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoko 20 ikasleren lagin batean (15 gizon eta 5 emakume), 22 eta 32 urte bitartekoak (batezbestekoa = 25.76 urte, DT = 3.7 urte). Esperimenduak CEISH-UPV/EHU, BOPV 32 (M10 2016 189), etika-batzordearen onspena jaso zuen, pribatutasun-eskubide guztien babesa eta esperimenduari buruzko lege egokiak betetzea bermatu zuena. Gainera, parte-hartzaile guztiek borondatez parte hartu zuten eta datuak modu anonimoan partekatze baimena eman zuten.

Esperimenduak hiru etapa izan zituen: lehenik, parte-hartzaileek bideo lasaigarri bat ikusi zuten fisiologiako oinarriko mailak ezartzeko. Ondoren, bi-



garren etapan, 3D zurezko puzzle bat osatu zuten egoera estresagarriak eragiteko. Azkenik, bideo lasaigarria erakutsi zitzairen berrero, egoera estresagarriaren ondoren haien fisiologia berrero lasaitzen ote zen ikusteko. Esperimentua amaitzean, parte-hartzaileek galdetegi bat osatu zuten eta banakako elkarrizketak egin zitzaizkien beren egoera emozionalari eta erreakzioei buruzko informazio gehigarria lortzeko etapa desberdinetan.

Probetan zehar, parte-hartzaileen EDA eta RR seinaleak erregistratu ziren, ondoren Ikaskuntza Automatikoko tekniken bidez aztertzeko. Biopac<sup>®</sup> MP36 gailua (1000 Hz-ko laginketa) eta Studentlab programa (seinale fisiologikoak eskuratzeko asko erabiltzen dena) erabiliz bildu ziren bioseinale horiek. Bi seinaleak elektrodoen bidez jaso ziren: bi elektrodo jarri ziren hatz nagia eta txikian EDA jasotzeko [159], eta hiru elektrodoen konfigurazioa [160] erabili zen elektrokardiogramarako (hortik eratortzen da RR seinalea).

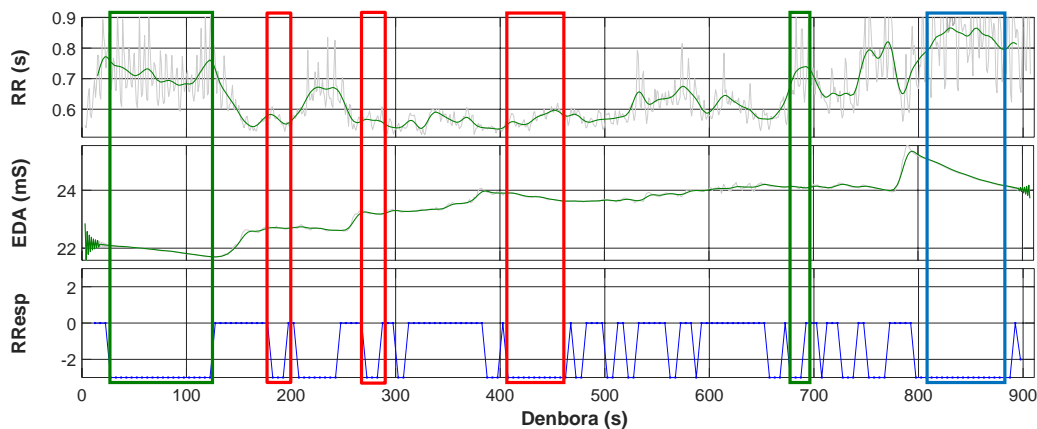
### **EDAREN eta RRREN ARTEKO HARREMANA EGOERA EMOSIONALEKIN**

EDA asko erabili da elektrofisiologiaren esparruan fenomeno mentalak detektatzeko, hala nola, nekea, estresa eta emozioak [161–166]. Aurretiko ikerketetan, taldeak frogatu zuten RRespak detekta daitezkeela EDA-n aldaketak monitorizatuz [156]. Seinale horrek azalaren eroankortasuna islatzen du eta nerbio-sistema sinpatikoaren aktibazioen ondorioz izerdia zenbat eta handiagoa izan, orduan eta balio handiagoa du [167, 168]. Ondorioz, eta efektu horren aurka, sistema sinpatikoaren inhibizioek seinale horren beherapena eragiten dute eta RResp bat gertatzen ari dela erakusten dute.

Ildo horretatik jarraituz, kapitulu honetan aurkezten den lanak RRespak detektatzeaz gain, erlaxazioa sortzen den egoera mentala ere bilatzen duen, egoeraren arabera aldatzen dena. Bibliografiak RR seinalearen portaera aztertu duten ikerketak aurkezten ditu estres mental, fisiko, atsedean eta erlaxazio egoeretan [169, 170]. Elektrokardiogramatik eratorritako seinale horren aukeraketaren oinarria da sistema kardiobaskularrak estres eta erlaxazio egoerak islatzen dituela, nerbio-sistema autonomoaren inerbazio sinpatiko eta parasinpatikoaren eragina baitu. Gainera, erlaxazioaren testuinguruan, meditazioak bihotz-maiztasunaren aldakortasunean duen eragina ikertu da, eta elektroentzefalografiako datuak eta bihotz-seinaleak konbinatuz erlaxazio- eta meditazio-mailak zenbatesteko algoritmo bat garatu da, RR seinalea barne [171, 172]. Beraz, taldeak RR seinalea eta EDA azterketan sartzeko erabakia hartu zuen, argi baitago bi seinaleak baliogarriak direla egoera emozionalak sailkatzeko.

Jarraian, 6.1. Irudian, esperimentuan bildutako RR eta EDA seinaleen adibide bat agertzen da. Gris argian, aurreprozesatu gabeko seinaleak irudikatzen dira, hau da, hutsuneekin eta artefaktuekin. Algoritmoetan erroreak saihesteko, ekipoa jatorrizko seinaleak iragazi zituen, iragazitako seinaleak (berdea) lortuz. Azken grafikoak erregistroetan atzemandako RRespak erakusten ditu [156] lanean aurkeztutako algoritmo espezifiko baten bidez.

## 6. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAREN EKARPENAK EGOERA EMOZIONALAK DETEKTATZEKO



**6.1. Irudia:** Parte-hartzaile batengandik esperimentuan zehar lortutako RR eta EDA seinaleak, detektatutako RRespekin batera. Egoera mental desberdinei dagozkien RRespak kolore-koadroetan nabarmendu dira: urdina erlaxazio-egoeratako RRespentzat, berdea egoera basalatako edo atseden-egoeratako RRespentzat, eta gorria estres-egoeratako RRespentzat.

6.1. Irudiak hiru egoeratan RRespak esperimentatzen ari den pertsona baten adibidea erakusten du: atsedena, estresa eta erlaxazioa. Bideoa ikusten den bitartean, hau da, atsedenaldian, lehen koadro berdeak markatuta, RR tartekak eta EDAak egonkor jarraitzen dute. Puzzleak eragindako estresak iraun bitartean, bi bioseinaleen balioa handitu egiten da EDAk goi-ordoki batera iritsi arte, eta bihotz-maiztasunak, berriz, handitzen jarraitzen du. Une horiek, kolore gorriko enkoadraketetan, estresaren barruan erlaxazio-uneak ere antzeman daitezkeela erakusten dute. Azkenik, puzzlea osatu ondoren, koadro urdinak markatutako erlaxazioan, bihotz-aktibitatea eta EDA etengabe murrizten dira. 6.1. Irudiaren analisiak RRespak duten hainbat gertaera fisiologiko erakusten ditu, hainbat testuinguru mentaletan sortuak. Egoera horiek hautemateak erlaxazioa benetakoa den (erlaxazioa egoera mental erlaxatu batean) edo ez (erlaxazioa estres egoera mental batean) ebaluatzeko balio dezake. Horretarako, funtsezkoa da informazioa seinale fisiologikoetatik ateratzea.

### 6.2.2. Ezaugarriak ateratzea

Seinaleetatik parte-hartzaileen egoera mental desberdinak enpirikoki ondo-rioztatzeko potentziala kontuan hartuta, eta algoritmo baten bidez erreplikatzeko helburuarekin, ikertzaileek beren azterketan aurrera egin zuten leiho irris-takorreko metodologia bat aplikatuz seinaleetatik hainbat ezaugarri ateratzeko. Teknika hau seinaleak segmentu txikiagoetan banatzean datza. Horrela, segmentu bakoitza modu independentean aztertzen da, hainbat ezaugarri kalkulatzeko,

eta, ondoren, hurrengo segmentura egiten da aurrera, gainjartze txiki batekin, patroia posibleak ez zatitzeko.

Esperimentuan ateratako seinaleetarako leiho-tamaina egokiena zehazteko asmoz, taldeak literatura berrikusi zuen, eta EDA hainbat leiho-luzerekin aztertu zela ikusi zuen, 10 eta 300 segundo artean [173–176]. Azterlan horietan oinarrituta, osagai fasikoarekin lotutako ezaugarriak kalkulatzeko gomendatzen da, estimulua hasi eta 5 segundoko leihoak erabiliz [177]. Osagai tonikoari dagokionez, 20 segundoko leihoak iradokitzen dira, 0.05 Hz inguruko goiko ebakitzemaiztasuna dute eta. 20 segundoko leihoak egokitzat jotzen dira, bi osagaien informazioa leiho bakar batean konbinatzeko aukera ematen duelako eta egokiak direlako jarduera elektrodermikoa aztertzeke. RR seinalearen analisiari dagokionez, autore batzuek 130 segundoko denbora luzeko leihoak erabili dituzte [174]; beste batzuek, aldiz, leiho askoz laburragoak erabili dituzte, hala nola [173]-n, 10 segundokoak. Azkenik, ekipoak 20 segundoko leihoak aukeratu zituen, haien artean 5 segundoko gainjartzearekin, bi arrazoirengatik: lehenik, RR seinalearen maiztasun-tartea [0.05-0.5] Hz-ren artean dago, eta horrek aldaketa geldoak atzematea ahalbidetzen du, eta osagairik txikiaren aldiarekin bat dator. Bigarren arrazoiak da EDA aztertzeke ere tamaina egokia dela.

Leiho irristakorraren ikuspegia aplikatu aurretik, ekipoak 0.5 Hz-ko beheko pasabide-iragazki batekin iragazi zituen seinaleak, garrantzirik gabeko informazioa ezabatzeko. Ebaketa-maiztasun horrek RR seinalearen maiztasun-espektroa eta EDAREN osagai tonikoaren informazioa gordetzen ditu, osagai fasikoaren zatirik handiena mantenduz.

### Denbora-eremuko ezaugarriak

Leiho irristatzailearen teknikaren bidez ateratako lehen ezaugarri-multzoa 6.1. Taulan agertzen da. Taula honetan, leiho bakoitzean lortutako denboraren eremuko analisiaren 13 ezaugarriak zerrendatzen dira. Nabarmendu behar da azken hiru ezaugarriak desberdinak direla, seinaleen parametroen arteko erlazioa islatzen dutelako eta NSA-ak sistema sinpatikoaren eta parasinpatikoaren arteko oreka erregulatzen duelako. Ezaugarri horiek aldaketak erakusten dituzte seinaleen frekuentzia altuenetan, eta azalerak handitu egiten dira berehalako seinaleen eta haien erregresio linealen artean, NSA aktibatzen denean. Gainera, *Norm* gisa markatutako ezaugarriak esperimentu osoaren RR seinalea normalizatu ondoren kalkulatu ziren, normalizazio lineal baten bidez 6.1 ekuazioaren arabera.

$$X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (6.1)$$

## 6. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAREN EKARPENAK EGOERA EMOZIONALAK DETEKTATZEKO

**6.1. Taula:** Aztertutako leiho bakoitzetik ateratako denbora-eremuko ezaugarriak.

Ezaugarria	Definizioa
RR_Max	RRren balio maximoa.
RR_Min	RRren balio minimoa.
RR_Range	RR RRren seinale-rangoa: balio maximoen eta minimoen arteko aldea.
RR_Mean	RRren batezbesteko balioa.
RR_Norm_Max	RR normalizatuaren balio maximoa.
RR_Norm_Min	RR normalizatuaren balio minimoa.
RR_Norm_Range	RR normalizatuaren seinale-rangoa: balio maximoen eta minimoen arteko aldea.
RR_Norm_Mean	RR normalizatuaren batezbesteko balioa.
RR_Slope	RRren erregresio linealaren malda leihoan.
EDA_Slope	EDAREN erregresio linealaren malda leihoan.
EDA/EDA_SurfDiff	EDAREN eta haren erregresio linealaren arteko azalera.
EDA/RR_SurfDiff	RRren eta EDAREN erregresio linealaren arteko azalera.
RR/RR_SurfDiff	RRren eta haren erregresio linealaren arteko azalera.

Taldekiek, halaber, 6.1. Taularen denboraren eremuko ezaugarrien batezbesteko eta desbideratze estandar balioak kalkulatu zituzten. Erregistro osorako balio bakarra ez izateko, parametro estatistiko horiek modu iteratiboan kalkulatu zituzten, azken lau leihoen ezaugarrien balioak bakarrik erabiliz, eta horrek epe laburreko memoria gisa jokatzen du gertakari fisiologiko berrientzat. 26 ezaugarri estatistiko horiek 6.1. Taulakoak bezala izendatu ziren, baina *Avg* atzizkiak gehituz batezbestekorako eta *Std* desbiderapen estandarerako. Guztira, 39 ezaugarri atera ziren denboraren eremuko analisisian.

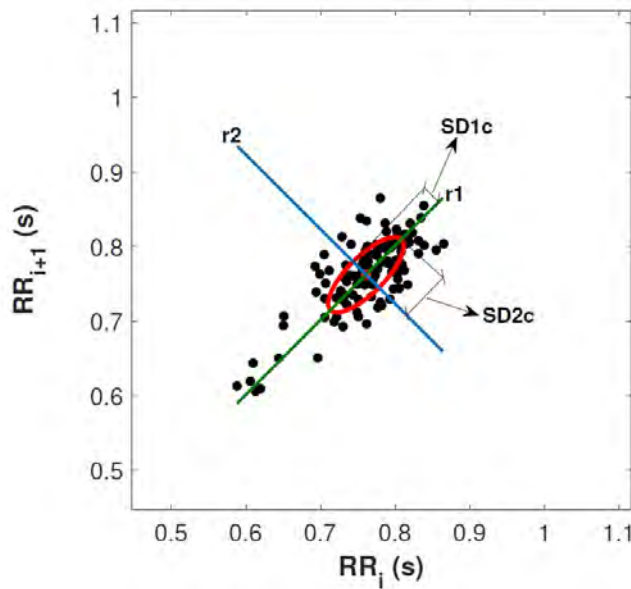
### Maiztasun-eremuko ezaugarriak

Denbora-eremua aztertu ondoren, RR seinalearen leihoak maiztasunaren eremuan ere aztertu ziren, eta horrek seinalearen espektroarekin lotutako bi ezaugarri gehigarri ekarri zituen. Lehenengo ezaugarriak (Pmax) aztertutako espektro osoko potentzia-balio maximoa adierazten du; bigarren ezaugarriak (fPmax), berriz, potentzia maximo hori zein maiztasunetan lortzen den adierazten du. Ezaugarri horietarako potentzia-espektroa [0.05-0.5] Hz-ren maiztasun-tartean kalkulatu zen, 0.05 Hz-ko bereizmenarekin.

### Ezaugarri ez-linealak

Azterketa horretan, RR seinalearen analisi ez-lineala ere egin zen, Poincaréren analisia erabilia. Analisi honek elektrokardiogramaren R puntuen arteko denbora-tarteak irudikatzen ditu sakabanatze-diagrama eliptiko batean. Irudikapen horretatik abiatuta, bihotzeko jarduerari buruzko informazio garrantzitsua atera zen, eta erdibitzaileei eta elipsearen morfologiarekin lotutako beste alderdi batzuei erreparatu zitzaion [178, 179].

Analisi hori egiteko lehen urratsa sakabanatze-diagrama irudikatzea da. Horretarako,  $\vec{RR}$  denbora-bektoreak  $\vec{RR} = \{RR_1, RR_2, \dots, RR_{n-1}, RR_n\}$  forma duela onartuta, grafikatu beharreko puntuek  $\vec{x}$ -k (horizontala) eta  $\vec{y}$ -k (bertikala) koordinatu hauek izango lituzkete:  $\vec{x} = \{RR_1, RR_2, \dots, RR_{n-2}, RR_{n-1}\}$  eta  $\vec{y} = \{RR_2, RR_3, \dots, RR_{n-1}, RR_n\}$ . 6.2. Irudian agertzen den bezala, RR tarte bakoitza aurreko tartearekin alderatuta irudikatzeko prozesuak forma eliptikoa duen sakabanatze-diagrama bat ematen du emaitza gisa.



**6.2. Irudia:** Poincaréren sakabanatze-diagrama egitean lortutako elipsearen adibidea.

Elipsea lortu ondoren, Poincaréren grafikotik ateratako ezaugarriak elipse horren analisi matematikotik eratortzen dira. Ondorioz, zentroidearen posizioa  $\{x_c, y_c\}$  kalkulatu behar da. Hori egiteko,  $\vec{x}$  eta  $\vec{y}$  bektoreen batezbesteko balioa kalkulatu behar da:  $\{x_c, y_c\} = \{\bar{x}, \bar{y}\}$ . Zentroidearen kokapena ezagututa, puntu guztien eta zentroidearen arteko distantzia kalkulatu daiteke (6.2 ekuazioak) eta lehen bi ezaugarriak, SD1c eta SD2c, kalkulatzeko 6.3 ekuazioak, hurrenez

6. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAREN EKARPENAK  
EGOERA EMOZIONALAK DETEKTATZEKO

---

hurren erabil daitezke. Esanahiari dagokionez, SD1c-k elipsearen ardatzerdi txikiaren luzera adierazten du eta SD2c-k ardatzerdi nagusiaren luzera (ikus 6.2. Irudia).

$$d_i^1 = \frac{|(x_i - x_c) - (y_i - y_c)|}{\sqrt{2}} \quad (6.2)$$

$$d_i^2 = \frac{|(x_i - x_c) + (y_i - y_c)|}{\sqrt{2}}$$

$$SD1c = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i^1)^2}; \quad SD2c = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i^2)^2} \quad (6.3)$$

Analisiari jarraituz, elipsea zatitu daiteke  $x = y$  ekuazioa duen lerro zuzen bat erabiliz, ohiko  $r1$  ardatza erabili beharrean. Hori egitean, beste deskribatzaile bat lortzen da, SD1b, azterketa honetan ezaugarri gisa erabili zena. Deskribatzaile hori 6.4 ekuazioaren arabera lortzen da, eta bere balioa ia SD1c-ren berdina da grafikoko  $n$  puntuen kopuruak infinitura jotzen duenean.

$$SD1b = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6.4)$$

Halaber, posible da SD1b deskonposatzea bi osagaitan, SD1e eta SD1d,  $(SD1b)^2 = (SD1e)^2 + (SD1d)^2$ . Bi osagai horiek azterketa honetarako ere erabili ziren ezaugarri gisa, eta 6.5 formularen arabera lortzen dira. Garrantzitsua da kontuan hartzea soilik erdibitzaile nagusiaren gaintik dauden  $n_e$   $\{x_i, y_i\}$  puntuak erabili behar direla SD1e kalkulatzeko. Era berean, SD1d-rako erabili beharreko  $n_d$  puntuak erdibitzaile beraren azpian daudenak dira. Gainera,  $n_e$  eta  $n_d$  puntuen kopurua 6.3. Atalerako ere erabili ziren ezaugarri gisa.

$$SD1e = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n_e} (x_i - y_i)^2} \quad (6.5)$$

$$SD1d = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n_d} (x_i - y_i)^2}$$

Azkenik, Poincareren diagramatik eratorritako azken bi ezaugarriak,  $C_e$  eta  $C_d$ , SD1e-k eta SD1d-k SD1b-n izan zuten eraginari dagozkio.  $C_e + C_d = 1$  izanik, ezaugarri horiek 6.6 formulak erabiliz lor daitezke.

$$C_e = \frac{(SD1e)^2}{(SD1b)^2}; \quad C_d = \frac{(SD1d)^2}{(SD1b)^2} \quad (6.6)$$

Poincaréren analisi guztia amaitu ondoren, Ikaskuntza Automatikoaren analisisian erabili ziren 9 ezaugarri lortu ziren: SD1c, SD2c, SD1b, SD1e, SD1d,  $n_e$ ,  $n_d$ , Ce eta Cd.

Bestalde, atal hau laburtzeko, hiru eremuetatik ateratako ezaugarri guztiak konbinatzean, 50 ezaugarriko multzo bat sortu zen datu-basearen instantzia bakoitzeko.

## 6.3. Sailkapen-tresnaren diseinua

6.2. Atalean RRespak gertatzen diren hiru egoera mentalen artean automatikoki bereizteko erabili ziren ateratako ezaugarriak azaldu dira. Atal honetan, lan hori Ikaskuntza Automatikoko tekniken bidez egiteko egindako proposamena aurkezten da, zehazki, sailkapen-sistemen bidez. Esperimentuko parte-hartzaileen egoera mentalaren testuingurua bereizteko hainbat sailkapen-algoritmo nola entrenatu ziren deskribatuko da. Gainera, ezaugarri berri bat aurkeztuko da, RR\_Band, prozesuaren lehen emaitzak aztertu ondoren aurkitu zena eta sailkapenerako garrantzitsua izan zena.

### 6.3.1. Hasierako ikuspegia

Proposatutako estrategiak Gainbegiratutako Ikaskuntzako algoritmoak erabiltzen ditu RRespetan egoera mentalak sailkatzeko. Erabilitako datu-baseak 1641 instantzia ditu, horrela sailkatuta: 586 *RResp Erlaxazioan*, 646 *RResp Atsedenean* (basala edo atsedeen neutrala) eta 409 *RResp Estresean* (estresa). Instantzia bakoitzak 6.2.2. Azpiatalean azaldutako 50 ezaugarriak ditu. Hala ere, sailkatzaile guztiak Weka softwarea erabiliz eraiki ziren, konfigurazio lehenetsiekin, arauetatik sailkatzaile-multzoetaraino zihoazen sailkapen-paradigmak aplikatuz.

Azterlan honetan, izaera desberdineko 12 sailkatzailearen errendimendua ebaluatu zen, hala nola: One Rule (1R), Decision Tree (DT), k-Nearest Neighbours (1-NN and 5-NN), Naïve Bayes (NB), Radial-Basis Network (RBF), Support Vector Machines (SVM), Logistic Regression (LR), AdaBoost (AdaB, erabakitzeko 10 zuhaitz konbinatuz), Bagging (Bag, erabakitzeko 10 zuhaitzen konbinazioa erabiliz), Random Forest (RF, erabakitzeko 10 zuhaitz) eta Multilayer Perceptron (MLP). Analisisaren baliozkotasuna ziurtatzeko, baliozkotze gurutatuaren metodologiaren 10 exekuzio erabili ziren (10-fold). Emaitzek, ikus 6.2. Taula, AdaB sailkatzailea nabarmendu zuten jarduera onena izan zuenaren gisa,  $90.51 \pm 2.37\%$ ko batezbesteko zehaztasuna lortuz eta F1 puntuaziorik onena lortuz. Horrek oreka ona adierazten du zehaztasunaren eta berreskuratze-metriken artean [180].

## 6. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAREN EKARPENAK EGOERA EMOZIONALAK DETEKTATZEKO

**6.2. Taula:** Sailkatzailearen probaren errendimenduak, puzzlearen datu-basearen 50 ezaugarriak erabiliz: zehaztasunaren batezbestekoa %-tan (Prom. Exact.) eta zehaztasunaren desbideratze tipikoak %-tan (D.T. Exact.), F1 puntuazioa eta ROC kurbaren azpiko eremua (AUC).

Metrika	1R	DT	1-kNN	5-kNN	NB	RBF
Prom. Exact.	73.14	86.63	88.16	83.88	71.27	74.07
D.T. Exact.	3.01	2.55	2.20	2.67	3.33	3.80
Prom. F1	0.73	0.87	0.88	0.84	0.71	0.74
D.T. F1	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
Prom. AUC	0.79	0.92	0.91	0.95	0.87	0.87
D.T. AUC	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
Metrika	SVM	LR	AdaB	Bag	RF	MLP
Prom. Exact.	77.01	76.90	<b>90.51</b>	89.78	89.27	86.61
D.T. Exact.	3.10	3.30	2.37	2.18	2.37	2.73
Prom. F1	0.77	0.77	0.91	0.90	0.89	0.87
D.T. F1	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
Prom. AUC	0.86	0.91	0.97	0.97	0.97	0.95
D.T. AUC	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01

6.2. Taulan, Bag ( $\%89.78 \pm 2.18$ ) eta RF ( $\%89.27 \pm 2.37$ ) sailkatzaileek AdaB-tik oso hurbil zeuden zehaztasunak erakutsi zituzten. Hiru algoritmoek ROC(AUC) balio bera lortu zuten, eta horrek zailtzen du zein den onena zehaztea. Hori dela eta, analisi estatistikoko bat egin zen Friedman [130] testa erabiliz, eta horrek baztertu egin zuen algoritmo guztiek 0.05eko adierazgarritasun-mailaren pareko emaitza zehatzak izatearen hipotesi nulua.

Algoritmoek beren errendimenduan alde esanguratsuak zituztela baieztatu ondoren, egileek bigarren test estatistikoko bat egin zuten sailkatzaile onena zehazteko. Baliozkotze gurutzatuaren metodologia dela eta, t korrelatu bayestarra proba (BC testa) [131] erabili zuten hipotesi nulua garrantzi-probaren alternatiba egokientzat, noiz eta baliozkotze gurutzatuaren metodologia erabiltzen den sailkatzaile ugari konparatzeko. Test hau zehatzago deskribatzen da 4.5. Atalean. Azterketa estatistikoko honen emaitzen interpretazioari buruzko oroi-garri gisa, algoritmoak estatistikoki baliokideak direla jotzen da probabilitate-dentsitatearen funtzioaren (PDF) zati handiena baliokidetasun praktikoaren zonaldearen barruan badago (ROPE, [132]), eta batezbesteko zehaztasun-diferentzia  $\pm \%1$  baino txikiagoa bada.

BC testaren metodologia erabiliz, egileek 12 algoritmoetako bakoitza bere 11 aurkariekin alderatu zuten. Konparazio horren emaitzak matrize moduan agertzen dira (6.3. Irudia), non gelaxka berdeek adierazten duten errenkadaren algoritmoak zutabearenak baino zehaztasun handiagoa lortzeko probabilitate handiagoa duela, eta gelaxka gorriek kontrakoa adierazten dute. Gris argiko



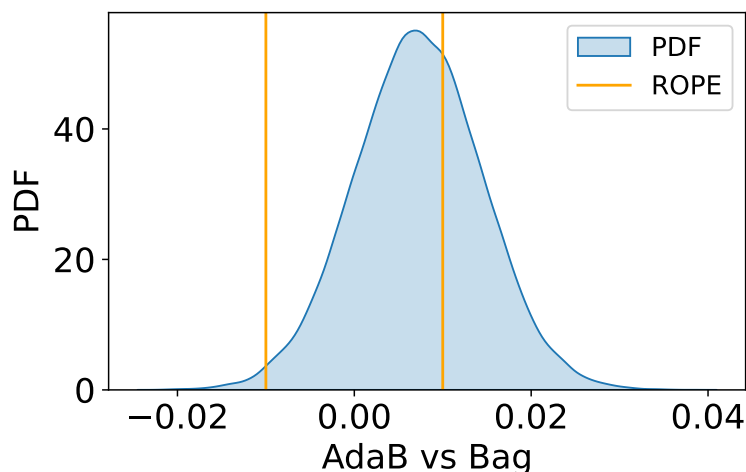
### 6.3. SAILKAPEN-TRESNAREN DISEINUA

gelaxkek adierazten dute algoritmoek modu baliokidean funtzionatzen dutela eta probabilitate-dentsitate gehiena ROPE zonaldearen barruan dagoela.

	1R	DT	1-NN	5-NN	NB	RBF	SVM	LR	AdaB	Bag	RF	MLP
1R		1.00	1.00	1.00	0.75	0.48	0.99	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00
DT	1.00		0.69	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.95	0.68
1-NN	1.00	0.69		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	0.74	0.55	0.70
5-NN	1.00	0.94	1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95
NB	0.75	1.00	1.00	1.00		0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RBF	0.48	1.00	1.00	1.00	0.95		0.95	0.92	1.00	1.00	1.00	1.00
SVM	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95		0.81	1.00	1.00	1.00	1.00
LR	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92	0.81		1.00	1.00	1.00	1.00
AdaB	1.00	1.00	0.93	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		0.64	0.61	1.00
Bag	1.00	0.99	0.74	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64		0.73	0.99
RF	1.00	0.95	0.55	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.61	0.73		0.96
MLP	1.00	0.68	0.70	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.96	

**6.3. Irudia:** Bikoteka egindako alderaketaren emaitzak, BC testa eta puzzlearen datu-basearen 50 ezaugarriak erabiliz. Gelaxketako balioek konparazioaren ondorengo probabilitatea adierazten dute. Koloreak adierazten du ilararen algoritmoa zutabearena baino hobea (berdea) edo okerragoa (gorria) den. Zenbat eta kolore biziagoa, orduan eta probabilitate handiagoa. Gelaxka grisek adierazten dute algoritmoek modu baliokidean funtzionatzen dutela.

6.3. Irudian ikus daitekeenez, AdaB algoritmoak du garaipen kopuru handiena pareen arteko konparazioetan. Gainera, AdaB-en eta Bag-en arteko kasu espezifikoan, %64ko probabilitatea dago modu baliokidean funtzionatzeko. Hala ere, konparazio horren PDFaren irudikapena xehetasun handiagoz aztertuz gero (ikus 6.4. Irudia), ondoriozta daiteke PDFaren gainerako zatirik handienak AdaB-k Bag gainditzeko probabilitate handiagoa duela adierazten duela. Beraz, egileek ondorioztatu zuten AdaB zela sailkapena egiteko aukerarik onena datu-basearen ezaugarri guztiak erabiliz gero.



**6.4. Irudia:** AdaB vs. Bag konparaziorako ondorengo PDFa.

Errendimenduaren analisisian, ohikoa da sistemak sinplifikatzea, konplexutasuna eta kostu konputazionalak murrizteko erabilgarritasun gutxien duen informazioa ezabatzen baita. Beraz, arazoaren dimentsioa murriztu eta ezaugarri garrantzitsuenak bakarrik erabiliz sailkatzaileen errendimendua hobetu ohi da. Hori dela eta, hiru egoera mentalen artean bereizteko dauden 50 ezaugarri garrantzitsuenen hautaketa aztertu zen. Horretarako, Wekaren Korrelazioan oinarritutako Ezaugarriak Hautatzeko (CFS) [181] metodoaren best-first (greedy) implementazioa erabili zen. Teknika honek 11 ezaugarri oso bereizgarri hautatu zituen: RR\_Mean, RR\_Norm\_Mean, RR\_Max, RR\_Min, RR\_Norm\_Max, RR\_Norm\_Mean\_Avg, RR\_Norm\_Max\_Avg, RR\_Norm\_Min\_Std, RR\_Slope, EDA\_Slope\_Avg eta EDA/EDA\_SurfDiff.

Horrela, arazoaren dimentsioa murrizteak eta ezaugarri garrantzitsuenak bakarrik erabiltzeak sailkatzaileen errendimendua hobetu egin zuen. Errendimendu hori, 11 ezaugarriak erabiliz, 6.3. Taulan agertzen da. Taula horretan, RFk batezbesteko zehaztasunik onena lortu zuen ( $90.34 \pm 2.32$ ), eta, ondoren, AdaB algoritmoak ( $90.24 \pm 2.56$ ) eta Bag algoritmoak ( $89.88 \pm 2.33$ ). Gainera, hirurek F1 balio bera lortu zuten eta AUC oso antzekoak.

Antzeko errendimendu-balioak dituzten algoritmoak lortu ondoren, egileek lehen aipatutako estatistika-probak egin zituzten zera zehazteko: ea hirurak baliokideak ziren edo zein zen onena. Friedmanen testak hipotesi nulua baztertu zuen, algoritmo guztiek berdin jokatu ez zutela adieraziz. BC testak AdaB, Bag eta RF algoritmoak alderatu zituen, eta hiru algoritmoetarako probabilitate maximoaren dentsitatea ROPEren mugen barruan zegoela erakutsi zuen. BC testak prestazio baliokideak adierazi zituen arren, 6.3. Taula behatzean, agerian

geratu zen RFk zehaztasun onena eta desbiderapen tipiko txikiena lortu zuela 12 algoritmoen artean. Beraz, egileek RFa erabiltzea erabakiko lukete, bat aukeratu beharko balute. Gainera, CFS metodoa aplikatzean eta 11 ezaugarri bakarrik hautatzean, sailkapena errazagoa eta azkarragoa izan zen, batezbesteko zehaztasunaren 0.5 baino kostu txikiagoarekin (AdaB (50 ezaugarri) = %90.51 eta RF (11 ezaugarri) = %90.34).

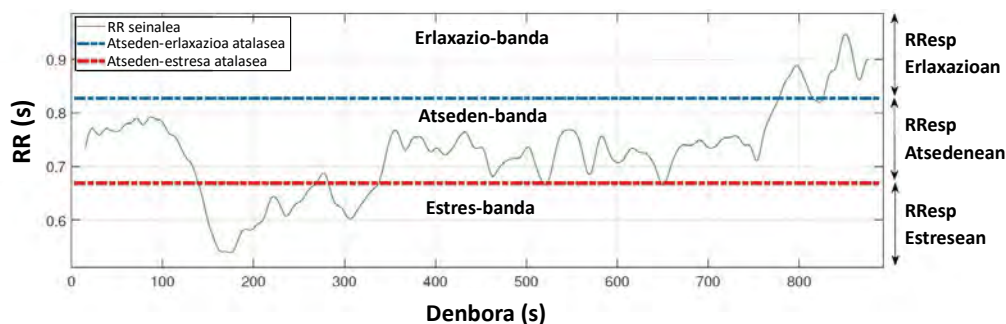
**6.3. Taula:** Sailkatzailearen probaren errendimenduak, CFS algoritmoak puzzlearen datu-baserako hautatutako 11 ezaugarriak bakarrik erabiliz: zehaztasunaren batezbestekoa %-tan (Prom. Exact.) eta zehaztasunaren desbideratze tipikoak %-tan (D.T. Exact.), F1 puntuazioa eta ROC kurbaren azpiko eremua (AUC).

Metrika	1R	DT	1-kNN	5-kNN	NB	RBF
Prom. Exact.	73.14	87.11	89.65	87.87	72.76	72.24
D.T. Exact.	3.01	2.77	2.39	2.36	3.35	3.32
Prom. F1	0.73	0.87	0.90	0.88	0.73	0.74
D.T. F1	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03
Prom. AUC	0.79	0.92	0.92	0.97	0.88	0.88
D.T. AUC	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
Metrika	SVM	LR	AdaB	Bag	RF	MLP
Prom. Exact.	75.46	76.07	90.24	89.88	<b>90.34</b>	81.80
D.T. Exact.	3.35	3.11	2.56	2.33	2.32	3.25
Prom. F1	0.76	0.76	0.90	0.90	0.90	0.82
D.T. F1	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
Prom. AUC	0.85	0.90	0.97	0.98	0.98	0.93
D.T. AUC	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02

### 6.3.2. Azken ikuspegia

6.3.1. Azpiatalaren emaitzak aztertu ondoren, egileek ikusi zuten CFSk hautatutako 11 ezaugarrietatik 8 RR seinalearen rangoarekin eta balioekin lotuta zeudela: RR\_Mean, RR\_Norm\_Mean, RR\_Max, RR\_Min, RR\_Norm\_Max, RR\_Norm\_Mean\_Avg, RR\_Norm\_Max\_Avg eta RR\_Norm\_Min\_Std. Hori ikusita, egileek RR seinalearekin lotutako ezaugarriak sintetizatu zituzten RR\_Band izeneko ezaugarri bakar batean, hiru baliotan banatzen dena: *1-erlazazio-banda*, *2-banda basala edo atsedeen-banda* eta *3-estres-banda*. Azterketa-leiho batean RR\_Band balioa esleitzeko mugak zehazten dira, seinale osoan maximo absolutuaren eta minimoaren arteko aldea hiru banda berdinetan zatituz. Ikus 6.5. Irudia. Gero, RR\_Mean balioa erabiltzen da aztertutako leihoa zein bandakoa den erabakitzeko. RR\_Band ezaugarri hori soluzio sendo eta moldagarri gisa agertzen da, mugak azterketa-subjektuaren fisiologia indibidualaren arabera-koak baitira.

## 6. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAREN EKARPENAK EGOERA EMOZIONALAK DETEKTATZEKO



**6.5. Irudia:** RR\_Band ezaugarriak RR seinalearen anplitudea diskretizatzen du hiru bandatan: 1 erlaxazio-bandarako, 2 atsedeen-bandarako eta 3 estres-bandarako.

Instantzia guztietarako RR\_Band balioa kalkulatu ondoren, ikertzaileek esperimentazioa errepikatu zuten 12 sailkatzaileekin, ezaugarri berri horrek sailkapena hobetzen zuen ikusteko. 6.3.1. Atalak bezala, lehenik, jatorrizko 50 ezaugarriak gehi RR\_Band biltzen zituen azpiespazio bat esploratu zuten, eta, ondoren, CFS algoritmoak hautatutako ezaugarriak bakarrik zituen beste azpiespazio bat, RR\_Band barne.

Lehen probaren emaitzak 6.4. Taulan erakusten dira, non algoritmo guztien zehaztasunean gorakada nabarmena ikusten den: aurreko esperimentuetan errendimendu txarrena izan zuten algoritmoek ere nabarmen egin zuten hobera, beren batezbesteko zehaztasunak  $71.27 \pm 3.33$ tik (NB) eta  $72.24 \pm 3.32$ tik (RBF) gutxienez  $89.46 \pm 2.11$ ko (NB) eta  $88.40 \pm 2.39$ ko (RBF) batezbesteko zehaztasunera handituz. Beraz, esan daiteke RR\_Band ezaugarri berria gehitzeak algoritmoen errendimendu orokorra nabarmen handitzea ekarri zuela, ezaugarri gehigarri hori erabiltzearen onurak nabarmenduz.

Testuinguru horretan, 51 ezaugarrirekin, AdaB, Bag eta RF ziren errendimendu onena zuten algoritmoak, eta, gainera, zeheztasun-, F1- eta AUC-balio antzekoak lortu zituzten. Taldeak Friedmanen testaren eta BC testaren konbinazio bat aplikatu zuen algoritmoen errendimendua alderatzeko. Friedmanen testak algoritmoek errendimendu baliokideak zituztela adierazi zuen. Hala ere, BC testak erakutsi zuen Bag algoritmoak konparazio kopuru handiena irabazi zuela konparazio matrizean (6.6. Irudia). Emaitza horietan oinarrituta, egileek bat aukeratu beharko balute, Bag aukeratuko lukete, konparazio gehiago irabazi zituelako eta gutxieneko desbideratze tipikoarekin batezbesteko zehaztasunik onena lortu zuelako 6.4. Taulan ikus daitekeen bezala (Bag =  $94.15 \pm 1.64$  vs AdaB =  $93.90 \pm 1.67$  eta RF =  $93.46 \pm 1.76$ ).

### 6.3. SAILKAPEN-TRESNAREN DISEINUA

**6.4. Taula:** Sailkatzailearen probaren errendimenduak, puzzlearen datu-multzoaren beste 50 ezaugarriei RR\_Band ezaugarria gehitu ondoren: zehaztasunaren batezbestekoa %-tan (Prom. Exact.) eta zehaztasunaren desbideratze tipikoak %-tan (D.T. Exact.), F1 puntuazioa eta ROC kurbaren azpiko eremua (AUC).

Metrika	1R	DT	1-kNN	5-kNN	NB	RBF
Prom. Exact	93.36	92.52	92.97	92.35	89.46	88.40
D.T. Exact.	1.86	1.65	1.57	1.91	2.11	2.39
Prom. F1	0.93	0.92	0.93	0.92	0.89	0.88
D.T. F1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Prom. AUC	0.95	0.95	0.95	0.98	0.97	0.95
D.T. AUC	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Metrika	SVM	LR	AdaB	Bag	RF	MLP
Prom. Exact	93.36	92.22	93.90	<b>94.15</b>	93.46	92.63
D.T. Exact.	1.86	1.76	1.67	1.64	1.76	1.93
Prom. F1	0.93	0.92	0.94	0.94	0.93	0.93
D.T. F1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Prom. AUC	0.96	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
D.T. AUC	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

	1R	DT	1-NN	5-NN	NB	RBF	SVM	LR	AdaB	Bag	RF	MLP
1R		0.61	0.81	0.51	1.00	1.00	1.00	0.62	0.80	0.69	0.86	0.68
DT	0.61		0.79	0.88	1.00	1.00	0.61	0.89	0.76	0.88	0.54	0.87
1-NN	0.81	0.79		0.73	1.00	1.00	0.81	0.66	0.55	0.63	0.80	0.84
5-NN	0.51	0.88	0.73		0.99	1.00	0.51	0.90	0.84	0.95	0.57	0.86
NB	1.00	1.00	1.00	0.99		0.54	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
RBF	1.00	1.00	1.00	1.00	0.54		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
SVM	1.00	0.61	0.81	0.51	1.00	1.00		0.62	0.80	0.69	0.86	0.68
LR	0.62	0.89	0.66	0.90	0.99	1.00	0.62		0.90	0.98	0.64	0.86
AdaB	0.80	0.76	0.55	0.84	1.00	1.00	0.80	0.90		0.94	0.82	0.69
Bag	0.69	0.88	0.63	0.95	1.00	1.00	0.69	0.98	0.94		0.69	0.84
RF	0.86	0.54	0.80	0.57	1.00	1.00	0.86	0.64	0.82	0.69		0.59
MLP	0.68	0.87	0.84	0.86	1.00	1.00	0.68	0.86	0.69	0.84	0.59	

**6.6. Irudia:** Bikotekako alderaketaren emaitzak, BC testa erabiliz, RR\_Band ezaugarria puzzlearen datu-basearen beste 50 ezaugarriei gehitu ondoren.

Egileek aurretiko esperimentua errepikatu zuten CFS erabiliz, ezaugarri garrantzitsuenak dituen azpiespazio bat sortzeko. Espero bezala, RR\_Band ezauga-

## 6. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAREN EKARPENAK EGOERA EMOZIONALAK DETEKTATZEKO

rria 6 garrantzizkoenen artean zegoen: RR\_Band, RR\_Mean, RR\_Norm\_Mean\_Std, EDA/EDA\_SurfDiff, EDA/RR\_SurfDiff eta RR/RR\_SurfDiff\_Std. Horrek iradokitzen du RR\_Band funtsezko ezaugarria dela RR seinalearen aldaketei buruzko informazioa sintetizatzeke, datu-base honetan behintzat. Azpimultzo honetako sailkapen-analisiaren emaitzak 6.5. Taulan aurkezten dira, eta berriro nabarmentzen da RR\_Band ezaugarriak sailkapenean duen onura esanguratsua. Ezaugarri hori eta CFS algoritmoa konbinatuz, errendimendu-metrika oso antzekoak sortu ziren algoritmo guztien artean, %1etik beherako aldearekin onenaren eta okerrenaren arteko batezbesteko zehaztasunean. Kasu honetan, RF algoritmoak erakutsi zuen errendimendurik onena ( $94.01 \pm 1.73$ ), batezbesteko zehaztasuna Bag-etik oso hurbil zegoela ( $93.94 \pm 1.75$ ). Aurkikuntza horiek RR\_Bandek sailkapen-prozesuan duen garrantzia sendotzen dute.

**6.5. Taula:** Sailkatzailearen probaren errendimenduak, RR\_Band ezaugarria gehitu ondoren eta soilik CFS algoritmoak puzzlearen datu multzorako hautatutako 6ak erabiliz: zehaztasunaren batezbestekoa %-tan (Prom. Exact.) eta zehaztasunaren desbideratze tipikoak %-tan (D.T. Exact.), F1 puntuazioa eta ROC kurbaren azpiko eremua (AUC).

Métrica	1R	DT	1-kNN	5-kNN	NB	RBF
<b>Prom. Exact.</b>	93.36	93.38	93.18	93.46	93.29	93.02
<b>D.T. Exact.</b>	1.86	1.97	1.92	1.85	1.87	1.81
<b>Prom. F1</b>	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
<b>D.T. F1</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
<b>Prom. AUC</b>	0.95	0.97	0.95	0.97	0.97	0.97
<b>D.T. AUC</b>	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01

Métrica	SVM	LR	AdaB	Bag	RF	MLP
<b>Prom. Exact.</b>	93.36	93.26	93.71	93.94	<b>94.01</b>	93.59
<b>D.T. Exact.</b>	1.86	1.82	1.86	1.75	1.73	1.75
<b>Prom. F1</b>	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94
<b>D.T. F1</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
<b>Prom. AUC</b>	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97
<b>D.T. AUC</b>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

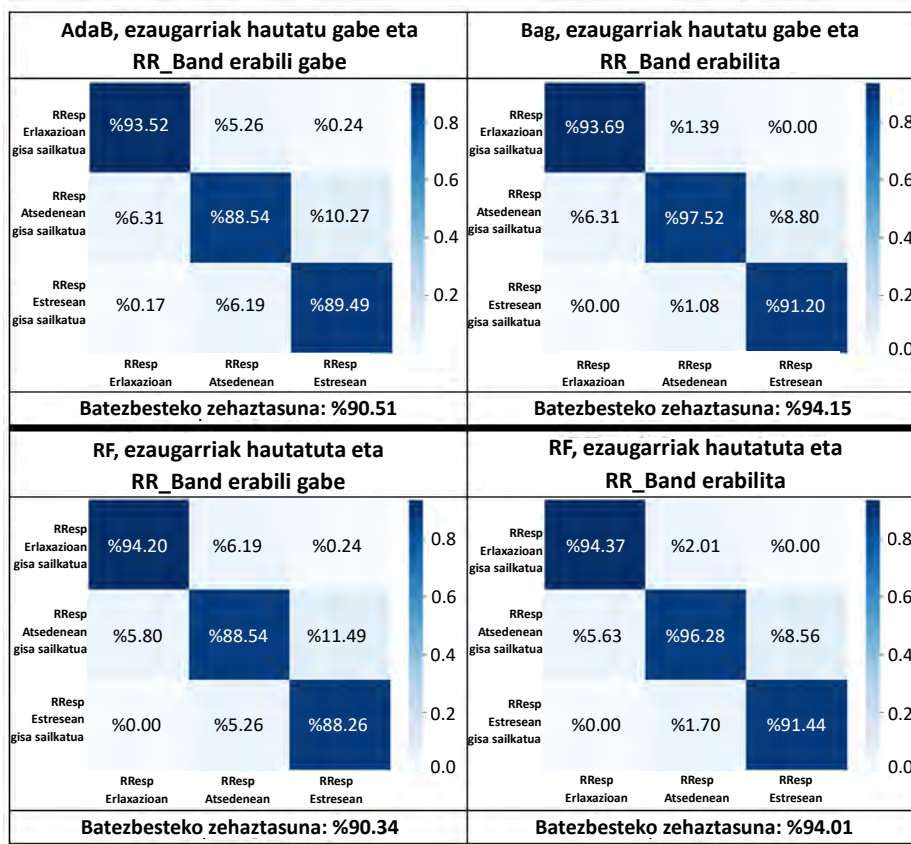
Emaitza horiekin, test estatistikoak egitea funtsezkoa izan zen sailkatzaileak modu justuan alderatzeko. Test horiei dagokienez, Friedmanen testak hipotesi nulua baztertu zuen bitartean (sentsibiltate oso handia du), BC testak matrize bat eman zuen, algoritmo guztiak modu baliokidean funtzionatzen ari zirela adierazten zuena. Zentzu horretan, 6.4. Taularen arabera, RF aukera onena izango litzateke egileentzat, errendimendu onena lortzea bilatuko balute. Emaitza horiek esparru berri bat irekitzen dute, non ez litzatekeen errendimenduan eragin handirik izango algoritmo sinpleago bat erabiliko balitz, adibidez, kostu txikiko hardware-gailu bat inplementatzeko. Gainera, esparru berri honek propietate esplikatzailerak dituen sailkatzaile bat erabiltzea ahalbidetuko luke, askotan aplikazio medikoetan nahi den atributua dena (azken erabakia medikuen esku

### 6.3. SAILKAPEN-TRESNAREN DISEINUA

dago beti, baina algoritmoaren azalpenak erabaki hori hartzen lagun diezaieke). Egileek 6.4. Atalean eztabaidatuko dute diseinu honen erabilera baliagarria izan daitekeen egoerei buruz.

Gainera, CFSk RR\_Band eta RR\_Mean ezaugarriak ere hautatu zituen garrantzitsuenetako bi balira bezala. Horregatik, egileek esperimentera errepikatu zuten, RR\_Band ezaugarriarekin %80tik gorako korrelazioa zuten ezaugarri guztiak eskuz ezabatuz (RR\_Mean barne). Hala ere, emaitzek okerrera egin zuten, eta horrek iradokitzen du RR\_Meanek informazio bakarra duela eta ezin dela RR\_Band bidez ordezkatu, azken horren bertsio jarraitua baita.

Emaitzen azterketarekin jarraituz, interesgarria da, halaber, zein egoera mental sailkatzeko zailenak diren jakitea. Informazio hori 6.7. Irudian dago. Irudi horretan, 6.2. eta 6.3. Tauletako eta 6.4. eta 6.5. Tauletako aztertutako bi kasuen sailkatzaile onenen nahaste-matrizeak agertzen dira.



**6.7. Irudia:** Sailkatzaile onenen nahaste-matrizeak, puzzlearen datu-basea erabiliz: AdaB CFS eta RR\_Band erabili gabe, RF CFS erabiliz baina ez RR\_Band, Bag RR\_Band erabiliz baina ez CFS eta RF RR\_Band eta CFS erabiliz.

## 6. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAREN EKARPENAK EGOERA EMOZIONALAK DETEKTATZEKO

---

6.7. Irudian erakutsitako emaitzek erakusten dutenez, RR\_Bandek sailkatzaileren errendimendua hobetzen du, CFSren erabilera alde batera utzita. Ezaugarri honek muturreko klaseen arteko nahasketak saihesten ditu (*RResp Erlaxazioan* eta *RResp Estresean*). Bestalde, ikus daiteke *RResp Atsedenean* klasea behar bezala sailkatzea dela lanik zailena, bere bitarteko izaeragatik eta beste bi motekin duen antzekotasuna dela eta. Emaitza horiek ezaugarri berriaren sendotasuna erakusten dute.

### 6.3.3. Erreferentziako datu-base batekin sailkatzeko tresnaren proba

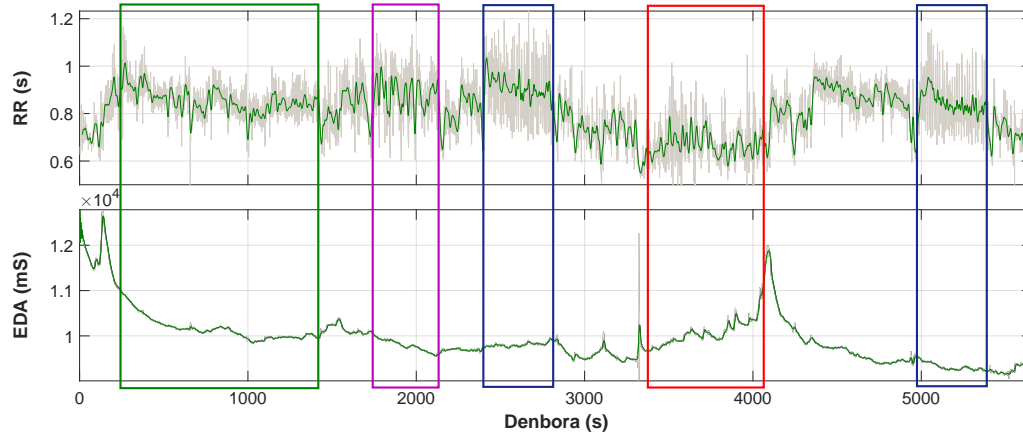
Puntu honetaraino, ekarpen honetan aurkeztutako sailkapen-tresna 3D puzzlearen esperimentuko datuetatik sortutako datu-baserekin bakarrik probatu zen. Hala ere, haren errendimendua beste datu-base batekin egiaztatzea behar zen, haren eraginkortasuna baliozkotu ahal izateko. Egileek ez zuten arazo bera lantzen zuen datu-baserik aurkitu bibliografian. Hori horrela, UCI biltegiko WESAD datu-basea [182] hautatu zuten konparazio horretarako. Arrazoiak honako hauek dira: alde batetik, bibliografian aitortutako datu-basea da, eta, bestetik, seinale fisiologikoen eta etiketek tresna hau diseinatzeko erabilitako puzzlearen datu-basearekin duten antzekotasuna.

WESAD datu-baseak 15 parte-hartzailearen (12 gizon eta 3 emakume) seinale fisiologikoen dituen, 27.5 urteko batezbesteko adinarekin. Bi gailu erabili ziren, RespiBan<sup>®</sup> eta E4 Wristband<sup>®</sup>, hainbat seinale fisiologiko biltzeko [182]. Lehenengoarekin toraxetik elektrokardiograma, EDA, elektromiograma eta azalaren tenperatura bildu ziren; bigarrenarekin, berriz, odol-bolumenaren pulsuak, EDA, larruazalaren tenperatura eta nagusi ez den eskuaren azelerometroaren seinalea jaso ziren. Konparaziorako, bi seinale bakarrik erabili ziren: EDAREna eta elektrokardiogramatik eratorritako RRAREna [182].

Datu-base honen esperimentua osatzen zuten probek hainbat egoeratan bildutako seinaleak biltzen zituzten. Alde batetik, bideoklipak edo diskurtsuak aurkezten ziren, atsedenaletatik, une estresagarrietatik eta dibertimenduko beste une batzuetatik zetozen egoerak sortzeko. Bestalde, parte-hartzaileen artean erlaxazio-egoerak sortzen ziren, meditazio-eraketak eginez. 6.8. Irudiak datu-basearen erregistro baten adibide bat erakusten du, EDA eta RR seinaleekin eta etapa bakoitzari dagokion etiketekin.

6.3.2. Atalean azaldutako sailkapen-tresna aplikatu ahal izateko, ekipoak bere algoritmoa erabili zuen RRespak detektatzeko [156] WESAD datu-baseko 15 erregistroetan, dibertigarritzat katalogatutako zatien RRespak kontuan hartu gabe, ez baitzetozen bat ekarpen honetan ikasitakoarekin. 4184 kasu detektatu ziren eta honela etiketatu ziren esperimentuaren etapen arabera: 1542 *RResp Erlaxazioan*, 2017 *RResp Atsedenean* eta 625 *RResp Estresean*. 6.3.2. Azpiatalean bezala, seinale fisiologikoen 6 ezaugarriak atera ziren (RR\_Band, RR\_Mean, RR\_Norm\_Mean\_Std, EDA/EDA\_SurfDiff, EDA/RR\_SurfDiff eta RR/RR\_SurfDiff\_Std), 12 algoritmoak entrenatu ziren eta batezbesteko zehaztasuna, F1 puntuazioa eta AUC metrikak kalkulatu ziren 10-folds 10 exekuziorekin baliozkotze gurutzatua erabiliz. Emaitzak 6.6. Taulan daude.





**6.8. Irudia:** WESAD datu-basearen erregistro baten seinaleak. Laukiek datu-basearen etiketak adierazten dituzte: berdea basal egoerarako, morea dibertsiorako, urdina meditaziorako eta gorria estreserako.

**6.6. Taula:** Sailkatzailearen probaren errendimenduak WESAD datu-basea erabiliz. Sailkatzeko ezaugarriak sei izan ziren, puzzlearen datu-baserako hautatuak.

Metrika	1R	DT	1-kNN	5-kNN	NB	RBF
Prom. Exact.	55.65	86.11	84.26	82.67	63.37	66.46
D.T. Exact.	2.54	1.92	1.71	1.91	1.99	2.15
Prom. F1	0.55	0.86	0.84	0.83	0.61	0.64
D.T. F1	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Prom. AUC	0.61	0.92	0.86	0.92	0.75	0.77
D.T. AUC	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
Metrika	SVM	LR	AdaB	Bag	RF	MLP
Prom. Exact.	65.87	68.31	<b>90.36</b>	89.68	88.92	71.69
D.T. Exact.	1.74	1.91	1.62	1.52	1.45	1.31
Prom. F1	0.63	0.67	0.90	0.90	0.89	0.71
D.T. F1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03
Prom. AUC	0.71	0.79	0.97	0.97	0.96	0.82
D.T. AUC	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03

6.6. Taularen emaitzek erakusten dutenez, proposatutako ikuspegia erabiliztean, algoritmo onenek %90 inguruko batezbesteko zehaztasuna lortu zuten. Jatorrizko datu-basearekin lortutako emaitzak baino %5 okerragoak badira ere,

## 6. KAPITULUA - IKASKUNTZA AUTOMATIKOAREN EKARPENAK EGOERA EMOZIONALAK DETEKTATZEKO

ontzat jotzen dira, datuak biltzeko prozedura esperimentaletan dagoen aldea dela eta. Horrela frogatu zen bai RR\_Band ezaugarriak bai proposatutako soluzioek orokortzeko gaitasun ona dutela.

Tresna baliozkotzen jarraitzeko, 6.9. Irudiak algoritmo onenaren (AdaB) nahaste-matrizea erakusten du proposatutako soluzioa WESAD datu-baseari aplikatzen zaionean. Irudi honetan ikusten da algoritmoak hobeto sailkatzen dituela estres-instantziak, baina zailtasunak aurkitzen ditu erlaxazio-etapetan (meditazioa) eta egoera basaletan RRespak bereizteko, 3D puzzlearen datu-basean ikusitako portaeraren antzekoa.



**6.9. Irudia:** Batezbesteko nahaste-matrizea AdaB algoritmoarentzat, WESAD datu-basea erabiliz. Sailkatzeko erabilitako ezaugarriak 6 izan ziren, puzzlearen datu-baserako hautatuak.

Azkenik, lan honen emaitzak WESAD jatorrizko erreferentzian lortutakoe-kin alderatu behar dira [182], modu justuan esan ahal izateko errendimendua bibliografian argitaratutakoaren mailan dagoela. Azterketa horretan, %93.12 batezbesteko zehaztasuna lortu zen analisi diskriminatzaile linealeko algoritmo bat erabiliz (LDA) bi klasetako arazo baterako (estresa vs. estresa ez). Aitzitik, ekarpen honek hiru klasetako arazo bati heltzen dio, egoera mental handiago baten azpiklaseak direnak, erlaxazioa. Azpiklase horien arteko aldeak [182]-n jorratutakoak baino sotilagoak direnez, batezbesteko zehaztasunean dagoen aldeak soluzioaren egonkortasun ona eta 6.3.2. Azpiatalean proposatutako RR\_Band ezaugarria berresten ditu.

## 6.4. Aplikazio praktikoak

Kapitulu honen sarreran aipatu zen bezala, pertsonak RRespak esperimentatzen ari diren testuinguru mentala detektatzea baliagarria izan liteke hainbat arlotan. Batez ere osasun mentalaren eremuan aplikatzen badira ere, beste diziplina mediko batzuetara ere hedatzen dira. Atal honetan, medikuntzarekin lotutako hainbat arlotan tresna hori erabiltzeak izan ditzakeen abantailak eta aplikazioak aztertzen dira.

Osasun mentalaren eta psikologiaren esparruan, tresna erabil liteke erlaxazio-eta mindfulness-tekniken errendimendua ebaluatzeko gizabanako desberdinetan [183]. Adibide gisa, [184] ikerketak agerian utzi zuen teknika horiek eragin positiboa dutela emozio negatiboak murriztean, emozio positiboei eragin gabe. Ondorio horietara iristeko, hainbat adierazle erabili ziren, hala nola Bost Alderdiren Erabateko Arretarako Galdetegia (FFMQ), Afektu Positibo eta Negatiboaren Eskala (PANAS), Antsietate Egoeraren Inbentarioa (S-AI), bai eta seinale neurofisiologikoen erregistroak ere, bihotz-maiztasuna, EDA eta pultsuaren maiztasunaren aldakortasuna barne. Izaera horretako azterlanen emaitza arrakastatsuak direnez gero, ekarpen honetan aurkeztutako sailkapen-tresna baliabide baliotsua izan daiteke, bai ikerketarako, bai psikologiako eta sofrologiako espezialisten eguneroko jardunerako. Gainera, zeregin garrantzitsua izan dezake azterlanak baliozkotzeko eta parte-hartzaileen egoera mentalean gertatzen diren aldaketak monitorizatzeko, arreta osoko teknikak aplikatzen dituzten bitartean.

Proposatutako sistemaren beste aplikazioetako bat osasun mentalean eta medikuntza tradizionalan oinarritzen da; esate baterako, minbizia diagnostikatutako pazienteetan erabiltzea, mina eta antsietatea arintzeko [185]. Beste adibide bat [157] azterketan dugu. Azterketa hori erradiologia interbentzionista perkutaneoko prozedurak jasan zituzten pazienteekin egin zen, eta frogatu zen ebakuntza egin aurretik sofrologia-teknikak erabiltzeak pazienteek jasan dako antsietatea eta mina murriztea zekarrela. Teknika horiek aplikatu ez zituen kontrol-talde batekin alderatuta, teknika horiek erabili zituzten pazienteek antsietate-maila nabarmen baxuagoak izan zituzten ebakuntzan, eta minaren pertzepzioa ere nabarmen txikiagoa izan zen. Emaitza horiek iradokitzen dute proposatutako tresna onuragarria izan daitekeela paziente bakoitzarentzako terapiarik egokiena identifikatzean, tratamenduaren onurak maximizatuta.

Atal honetako azken adibidean, osasun mentalaren ikuspegia gaixotasunen diagnostikora aldatzen da. Sarreran aipatu den bezala, diagnostiko batzuk proba esperimental batean jasotako seinale fisiologikoen balioen alderaketan oinarritzen dira. Kasu honetan, azterlan honetan proposatutako egoera mentalen sailkatzailearen erabilerak disreflexia autonomoaren (DA) diagnostikoa (aldez aurretik 2.3. Atalean zehaztua) nola bultza lezakeen erakusten duen adibide bat eskaintzen da. Patologia hori diagnostikatu nahi denean, ohikoa da pazienteei proba mediko inbaditzaileak egitea; izan ere, DAren ohiko eragileetako bat maskuria betetzearekin lotuta dago [34]. Proba horiek berekin dakarte esperimentuaren hasieran erregistratutako oinarritzko balio fisiologikoak ondoren proban zehar lortutako balioekin alderatzea. Hala ere, prozedura horiek hasierako

balioak distortsionatu ditzakete, pazienteek jasaten duten estresa dela eta. Alde horretatik, argi dago probaren lehen etapetan pazientearen egoera mentala ezagutzeak informazio baliagarria eman lezakeela klinikoentzat; izan ere, konparazioa egin aurretik, oinarritzko gisa erregistratutako balioei doikuntzak aplikatu ahal izango litzaizkieke, probaren zehaztasuna hobetuz.

## 6.5. Ondorioak

Azterlan honetan, pertsona batek erlaxazio-erantzuna (RResp) esperimentatu dezakeen hiru testuinguru mental automatikoki sailkatzeko erronkari heldu zaio. Esperimentu bat egin zen 20 ikaslerekin seinale elektrodermikoak eta elektrokardiografikoak biltzeko, eta datu-base bat sortu zen 1641 RResp episodioekin, hiru motatakoak: *RResp Erlaxazioan*, *RResp Atsedenean* eta *RResp Estresean*. Eremu desberdinetako 50 ezaugarri desberdin ere atera ziren, eta Gainbegiratutako Ikaskuntzako 12 algoritmoko multzo bat entrenatu zen sailkapenerako. Korrelazioan oinarritutako Ezaugarrien Hautaketa (CFS) teknika aplikatuta, ikusi zen Random Forest algoritmoak (RF) lortu zuela batezbesteko zehaztasunik onena ( $\%90.34 \pm 2.32$ ), eta, ondoren, AdaBoost-ek (AdaB), CFSrik gabe ( $\%90.51 \pm 2.37$ ).

Garrantzitsua da azpimarratzea aurkeztutako emaitzak baliozkotu egin zirela 10-folds 10 exekuzioekin dituen baliozkotze gurutzatuko metodologia baten bidez. Errendimendu onena duten algoritmoen hautaketa metodo estatistiko arreratuak aplikatuz egin zen, Friedmanen testa eta t korrelatu bayestarra proba (BC testa) barne, horrela lortutako emaitzen koherentzia eta fidagarritasuna bermatuz.

Ondoren, RR\_Band ezaugarri berri bat proposatu zen RR seinalearekin lortutako informazioa sintetizatzeke, eta algoritmoen probako esperimentua errepikatu zen. Proba horretan hobekuntza nabarmenak ikusi ziren horien guztien errendimenduan, bai ezaugarri guztiak erabiltzean (Bag =  $\%94.15 \pm 1.64$ ), bai CFS erabiltzean (RF =  $\%94.01 \pm 1.73$ ). Gainera, RR\_Bandek muturreko klaseen arteko nahasketak ere saihestu zituen. Emaitza on horiek ikusita, taldeak WESAD datu-basean hautatutako 6 ezaugarrien azpiespazioa probatzea erabaki zuen, eta AdaB algoritmoak lortu zuen batezbesteko zehaztasun onena ( $\%90.36 \pm 1.62$ ). Horrek iradokitzen du proposatutako soluzioak eta RR\_Band ezaugarriak beste datu-base batzuetara orokortzeko gaitasun ona dutela.

Hala ere, algoritmo guztien nahaste-matrizeak aztertu ondoren, ikusi zen bi-tarteko klasea *RResp Atsedenean* izan zela problematikoena. Beraz, klase hori zatitzea proposatu zen, akats-tasa hobetzeko, ikerketaren etorkizuneko jarraipenari begira.

IV. Zatia

**ONDORIOAK**



## 7. Kapituluia

# ONDORIOAK

### 7.1. Ondorioak

Tesi honetan aurkeztutako ekarpenek hainbat osasun-arlotan egindako aurre-  
rapenak adierazten dituzte, Ikaskuntza Automatikoko teknikak hainbat seinale  
fisiologikotan aplikatuz. Tesi honetan, giza gorputzaren ulermen zehatza ema-  
teko orduan analisi fisiologikoak duen garrantzia nabarmendu da, eta horrek  
onura nabarmenak dakartzkio gaixotasunen detekzio goiztiarrari, tratamenduen  
denbora errealeko jarraipenari, gaixotasun kronikoen kudeaketari eta arreta me-  
dikoaren pertsonalizazioari. Azken finean, Ikaskuntza Automatikoko teknikak  
seinale fisiologikoen analisisian integratzea funtsezkoa da, datu-multzo handien  
prozesatze eraginkorra ahalbidetuz eta patroien identifikazioa erraztuz, trata-  
mentuak pertsonalizatzen, denbora errealean monitorizazioa hobetzen eta iker-  
keta medikoa bizkortzen lagunduz.

Horrela, memoria honetan jasotako tesi-aldian egindako lehen ekarpena pa-  
tologiak detektatzea da, hainbat seinale fisiologiko aztertuz. Zehazki, disreflexia  
autonoma (DA) diagnostikatzen du, 2.3. Atalean xehetasunez azalduta. Ikus-  
pegi horrek berekin dakar hainbat seinale fisiologiko atzematea esperimendu ba-  
tean, non, medikuak gainbegiratuta, DA gertaera bat eragiten den. Ondoren,  
Ikaskuntza Automatikoko algoritmo desberdinek prozesatzen dituzten ezaugarri  
garrantzitsuak ateratzen dira, patologia horren presentzia identifikatzeko, gaixo-  
tasunaren hasierako diagnostikorako ahalik eta ez-inbaditzaile diren metodoak  
erabiliz, negatibo faltsurik gertatzen ez dela bermatuz.

Bigarren ekarpenari dagokionez, osasun mentalaren eremura bideratuta, erla-  
xazio-egoera emozionalak islatzen dituzten seinale fisiologikoetatik ateratako  
hainbat ezaugarriren azterketa zehatza egiten da. Azterketa hori esperimendu  
batean erregistratutako bioseinaleetatik ateratako ezaugarriei Ikaskuntza Au-  
tomatikoko algoritmoak eta proba estatistikoak aplikatuz egiten da. Esperi-  
mentu horretan, parte-hartzaileei erlaxazio- eta estres-egoerak eragiten zaizkie.  
Erlaxazio- edo estres-egoerekin lotutako aldaketa fisiologikoak detektatzea ez  
bezala, ikerketa hori haratago doa erlaxazio-erantzuna eman dezaketen egoera  
emozionalak bereizten saiatzean.

Tesia babesten duten bi ekarpenetan lortutako emaitzek, seinale fisiologikoen bilakaeraren ikerketan eta azterketan zentratuta, Ikaskuntza Automatikoa aplikatzearen erabilgarritasuna nabarmentzen dute, giza gorputzaren erantzun desberdinak aztertzeko eta patologiak zein egoera emozionalak identifikatzeko, osasuna hobetzen laguntzeko. Honako atal hauetan, 7.2. eta 7.3., tesi honetan landutako bi ildoetatik eratorritako funtsezko ondorioei helduko zaie. Ondoren, 7.4. atalak etorkizuneko lan-ildo nagusiak aurkeztuko ditu, eta, azkenik, 7.5. atalak tesi hori babesten duten egindako argitalpenak azalduko ditu.

### **7.2. Patologiak detektatzeko informazio fisiologikoa eta Ikaskuntza Automatikoko teknikak**

Gurutzetako Unibertsitate Ospitalearekin lankidetzan, ikerketa-taldeak funtsezkotzat jo zuen Ikaskuntza Automatikoko teknikak erabiltzea bizkarrezurmuinean lesioak (BML) zituzten pazienteetatik ateratako informazioa aztertzeko. Ekimen honen helburua da DA gertakarien agerpena goiz detektatzea. Xede horrekin, esperimentu bat egin zen afekzio horren gertakariak artifizialki eragiteko, medikuak gainbegiratuta. Helburu nagusia datu-base bat sortzea izan zen, medikuek DA gertakariak detektatzeko funtsezkotzat jotzen duten informazioa bilduko zuena. Informazio horrek historia klinikoko datuak bildu zituen, baita aldaketa hormonalei buruzko informazio fisiologikoa eta lau bioseinale espezifiko ere: presio arterial sistolikoa eta diastolikoa, bihotz-maiztasuna eta erresistentzia periferiko osoa.

Informazio guztia bildu ondoren, hurrengo urratsa datuak aurreprozesatzea izan zen, garrantzitsua ez zen informazioa eta seinale fisiologikoak biltzeko prozesutik eratorritako interferentzia posibleak ezabatuz. Aurreprozesamenduaren ondoren, datu basea sortu zen, eta bertan jasotzen zen irizpide mediko bidez gertakari disreflexikoak detektatzeko balekotzat jotzen zen informazio guztia. Analisiaren ikuspegiaren zati garrantzitsu bat seinale fisiologikoak grafikoki bistaratzea izan zen, eta, horri esker, medikuek eta ikerketa-taldeak denboran zehar izan duten bilakaera behatu ahal izan zuten, eta pazienteen arteko konparazio bisualak egin ahal izan zituzten.

Datu-basearen ezaugarrien garrantziaren analisi estatistikoa egin ondoren, egokitzen jo zuen Ikaskuntza Automatikoko teknikak aplikatzea patologia horren hasierako diagnostikoa egiteko, bi irizpide giltzarri betez. Lehenik eta behin, informazioa ahalik eta modu ez-inbaditzaileenean lortzea bilatu zen, pazientei eragozpenak eragin diezazkieketen prozesuaren zatiak ezabatzeko, datuak biltzea erraztuz eta beharrezkoak ez diren deserosotasunak saihestuz. Bigarren irizpideari dagokionez, medikuen ikuspegitik, ezin zen onartu negatibo faltsuen (FN) iragarpenik. Hau da, DAko gertakariak garatzeko joera duen pazienteak ezin da gaizki sailkatu paziente osasuntsu gisa. Beraz, Ikaskuntza Automatikoko tekniken bidezko analisiak ahalik eta emaitza zehatzenak sortu behar zituen,



### 7.3. EGOERA EMOZIONALAK DETEKTATZEKO INFORMAZIO FISIOLGIKOA ETA IKASKUNTZA AUTOMATIKOKO TEKNIKAK

---

FNren tasa nulua izango zela ziurtatuz eta ahalik eta modu ez-inbaditzaileenean lortutako informazioa erabiliz.

Aipatutako bi irizpide horiek betetzeko, Ikaskuntza Automatikoko sailkatze-ko 11 algoritmo aukeratu ziren datu-basearen ezaugarriak lantzeko. Lehen irizpidea betetzeko, algoritmoek hainbat espaziotan lan egin zuten, maskuria betetzeko prozesuarekin lotutako zati inbaditzailea kenduz. Algoritmoek lortutako zehaztasunak alderatu ondoren, DAREN agerpena sailkatzaile bakar batekin diagnostikatzea ezinezkoa zela ondorioztatu zen. Beraz, bi mailako sistema hierarkikoarekin lan egitea erabaki zen. Lehen mailan, 11 algoritmoek historia klinikotik modu ez-inbaditzailean lortutako ezaugarriak erabili zituzten, eta emaitza ez-eztabaidaekin 11 algoritmo horiekin aztertu ziren berriro, bigarren maila batean. Bigarren maila horretan, probetan zehar ahalik eta ez-inbaditzaileko moduan lortutako informazio fisiologikoarekin lan egin zen. Emaitza berriak aztertu ondoren, asmatutakoen indizea nabarmen handia zela ikusi zen, eta algoritmo batzuek patologiaren agerpena detektatzea ere lortzen zuten, negatibo faltsurik sortu gabe. Zehazki, Naïve Bayes algoritmoak (NB) FNren tasa nulua lortu zuen, eta iragarpen egokia egiteko gai izan zen, %93.10eko zehaztasun-indizearekin.

Garatutako konponbidea Gurutzetako Unibertsitate Ospitaleko profesional klinikoei aurkeztu ondoren, haiek egokitzat jo zuten zehaztasun handia lortzeagatik, eta, aldi berean, mediku-taldeak patologia diagnostikatzeke ezarritako bi irizpideak bete ziren: informazioa lortzeko proba inbaditzaileen erabilera murriztea eta negatibo faltsuen tasa zerora murriztea.

### 7.3. Egoera emozionalak detektatzeko informazio fisiologikoa eta Ikaskuntza Automatikoko teknikak

Osasun mentalaren eremuan seinale fisiologikoen analisiaren garrantzia aurretiko ikerketek babestu dute [155, 156]. Ikerketa horiek erakutsi zuten zenbait seinale fisiologiko aztertzean hainbat egoera emozional bereiz daitezkeela. Zehazki, RR seinalea (elektrokardiogramatik lortua) eta jarduera elektrodermiko (EDA) erabiliz, estres-maila desberdinak sailkatzea eta organismoaren erlaxazio-erantzunak (RRespak) detektatzea lortu zen. RRespak detektatu ondoren, argi geratu zen erlaxazio-erantzun horietan gizabanakoen egoera emozionala ez zela uniformea. Erlaxazio-egoeran sartzea hainbat egoeratan gerta daiteke, bai meditazio-uneetan, bai estres arineko egoeretan. Kasu horietan, gizabanakoak, urduri egon arren, ez du erlaxazio-eremu hori uzten. Horregatik, bigarren ekarpenaren helburua haratago joatea da, eta, Ikaskuntza Automatikoko tekniken aplikazioari esker, egoera emozionalak ez ezik, RResp-en barruko azpiegoerak ere bereizteko gai izatea.

Helburu hori lortzeko asmoz, ikertzaileek Bilboko Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoko ikasleen talde bati egoera estresagarriak eta lasaigarriak eragiteko diseinatutako esperimentu bat egin zuten. Esperimentu horretan, egoera lasai-

garriak meditazio-bideoak ikusiz eragiten ziren, eta egoera estresagarriak, berriz, 3D puzzle baten bidez sortzen ziren. Prozesu osoan zehar, parte-hartzaileen RR eta EDA seinaleak erregistratu ziren, seinale bakoitzetik hainbat ezaugarri ateratzeko helburuarekin eta lan egiteko datu-base bat sortzeko. Datu-base horren fidagarritasuna bermatzeko, jatorrizko seinaleak iragazi egin ziren, datuak biltzeko prozesuari datxezkion zaratak ezabatzeko. Seinaleak iragazita zeudela, guztira, izaera desberdineko 50 ezaugarri atera ziren (leiho irristakorreko metodologia bat aplikatuz): denbora-eremua, maiztasun-eremua eta ezaugarri ez-linealak (Poincaré).

Hurrengo urratsean, 12 sailkapen-algoritmo erabili ziren, sortutako datu-basearen 50 ezaugarriekin, RRespak sortzen diren hiru egoera mentalen (erlaxazioa, basala, erlaxazioa eta estresa) artean automatikoki bereizteko. Lortutako emaitzak alderatu ondoren, hiru egoerak behar bezala sailkatzeko algoritmo eraginkorrenak AdaBoost (AdaB), Bagging (Bag) eta Random Forest (RF) izan zirela identifikatu zen, %90.51, %89.78 eta %89.27ko zehaztapenekin, hurrenez hurren. Lortutako zehaztasunak antzekoak izan arren, algoritmo horien artean desberdintasun esanguratsuak zeudela berresteko, analisi estatistikoki bat egin zen Friedmanen testa erabiliz. Test honek baztertu egin zuen algoritmo guztiek emaitza baliokideak zituztela diogen hipotesi nulua 0.05eko garrantzi-mailarekin. Errendimenduan alde esanguratsuak zeudenez, eta sailkatzailerik onena zein zen zehazteko, t korrelatu bayestarra proba (BC testa) izeneko bigarren test bat egin zen, 12 algoritmoetako bakoitzak bere 11 lehiakideekin alderatzeko. Lortutako emaitzek adierazi zuten AdaB izan zela banakako konparazioetan garaipen gehien lortu zituen algoritmoa, eta, ondorioz, emaitza onenak zituen algoritmoa zela ondorioztatu zen, sailkapenerako datu-basearen 50 ezaugarriak erabiltzen zirenean.

Ezaugarri kopuru handiagatik eta informazio erredundantea ezabatzean sailkatzaileen errendimenduak hobera egiten duela kontuan hartuta, Ezaugarriak Hautatzeko Korrelazioan oinarritutako metodoa (CFS) aplikatzea erabaki zen, ezaugarrien kopurua 50etik teknika horrek emandako 11 oso diskriminatzaileetara murrizteko. 11 ezaugarriko datu-base berriarekin aurreko prozesua errepikatu ondoren, AdaBk emaitzarik onenak lortu zituela ondorioztatu zen, %90.34ko zehaztasunarekin. Beste era batera esanda, ezaugarri multzo txiki batekin lan egiteak sailkapen-prozesua erraztu eta bizkortu zuen, 50 ezaugarri erabiltzean lortutako balioarekin alderatuta, %0.5etik beherako batezbesteko zehaztasun-galera baten mende.

Ondoren, lortutako emaitzak aztertzean, ikusi zen CFSk hautatutako 11 ezaugarrietatik 8 RR seinalearen rangoari eta balioei lotuta zeudela. Beraz, RR seinalearekin lotutako ezaugarriak RR\_Band izeneko bakar batean sintetizatzea erabaki zen, eta hiru baliotan banatzen da: *1-erlaxazio-banda*, *2-basaledo atsedeen-banda* eta *3-estres-banda*. Gero, aurreko bi esperimentazioak errepikatu ziren, eta horietako bakoitzean ezaugarri berria txertatu zen. Lehenengo kasuan, 51 ezaugarriekin lan egin zenean, zehaztasunak nabarmen hobetu ziren, eta Bag algoritmoa izan zen emaitzarik onenak lortu zituenena, %94.15eko zehaztasunarekin. Bigarren kasuan, berriz erabili zen CFS teknika eta honek 6 ezaugarri diskriminatzaile hautatu zituen, RR\_Band ezaugarri berria barne.

Egoera horretan, emaitzek ere hobekuntza nabarmenak erakutsi zituzten ezau-garri berria erabiltzen ez zuenarekin alderatuta, eta RF algoritmoa nabarmendu zen emaitzarik onenak eman zituena izan baitzen, %94.01eko zehaztasunarekin.

Azkenik, proposatutako sistema orokorrean aplikatzeko helburuarekin emaitzak aztertu ondoren, esperimentazio berak egitea erabaki zen WESAD datu-basea erabiliz. Bibliografian aipatutako datu-base horrek ikerketa-taldeak sortutakoarekin antzeko ezaugarriak ditu. Testuinguru horretan, algoritmo onenek %90 inguruko zehaztasuna lortu zuten, eta zifra hori jatorrizko datu-basearekin lortutako emaitzak baino %5 txikiagoa bada ere, gogobetegarritzat jotzen da, datuak biltzeko prozedura esperimentaletan dauden aldeak direla eta. Horrela, agerian geratu zen RR\_Band ezaugarriak eta proposatutako konponbideek orokortzeko gaitasun ona erakusten dutela.

## 7.4. Etorkizuneko lan-ildoak

Lehen ekarpenari dagokionez, eta lortutako emaitzak arrakastatsuak izan arren, ikerketa-taldeak etorkizuneko bi lan-norabide posible ebaluatu zituen. Lehenengoak azterlanaren lagina handitzea eskatzen zuen, esperimentuetan tamaina handiko laginak erabiltzearen garrantzia nabarmenduz, emaitzen orokortze egokia lortzeko. Tamaina handiko lagin batek biztanlerian dauden dibersitate eta aldakortasuna atzemateko probabilitatea handitzen du, estatistikaren ikuspegitik emaitza fidagarriagoak emanez, konfiantza-tarte estuagoekin eta zehaztasun handiagoarekin. Aldi berean, lagin txikiek balio atipikoen edo ausazko aldaketen eragina jasan dezakete, eta lagin-tamaina handi batek faktore horien inpaktua murrizten laguntzen du, emaitza egonkorragoak eta sendoagoak sortuz. Emaitzak testuinguru zabalagoetara edo populazio desberdinetara orokortzea baliozkoagoa da lagin handiekin, eta alderdi hori funtsezkoa da ingurune espezifiko batean ateratako ondorioak egoera desberdinetan aplikatzeko. Beraz, faktore horiek kontuan hartuta, prozesua errepikatzeko ideia planteatu zen, laginaren tamaina handitzeko; izan ere, esperimentazio honetan erabilitakoa txikia izan zitekeen emaitzak populazio global batera orokortzeko.

Etorkizuneko bigarren ildoak DAREN diagnostikoa egiteko propietate esplikatzaileak dituzten sailkatzaileak erabiltzean oinarritzen da. Adimen Artifizialean eta Ikaskuntza Automatikoan propietate esplikatzaileak dituzten sailkatzaileak erabiltzeak hainbat abantaila ditu ez dituzten metodoekiko. Sailkatzaile horiek interpretagarritasun handiagoa ematen dute, eta horrek erabakiak hartzeko prozesua ulertzea errazten du, eta hori funtsezkoa da medikuntzaren esparruan, esaterako. Entrenamendu-datuetan alborapenak detektatzeko eta horiei heltzeko gaitasuna funtsezko beste abantaila bat da, iragarpenetan ekitatea sustatuz. Gainera, giza ikaskuntzako prozesua errazten dute, algoritmoen funtzionamenduari buruzko informazioa ematen baitute, eta, horrela, dagokion aplikazio-eremuan ezagutzak garatzen laguntzen dute. Era berean, azalpenek erudian egon daitezkeen akatsak edo gaizki ulertuak identifikatzeko aukera ematen dute, errendimenduan zuzenketak eta hobekuntzak egiteko aukera emanez. Arrazoi horiengatik, eta azterlan honetan proposatutako sistema hierarkikoaren

muga kontuan hartuta, klase konkretu bat aukeratzeari buruzko inolako azalpenik ematen ez duena, iradoki zen propietate esplikatzaileak dituzten algoritmoak erabiliz, sailkapena sendoa eta ez-inbaditazilea izateaz gain, profesional klinikoei erabaki diagnostikoak hartzea babestuko zuen azalpen bat ere emango ziela.

Azkenik, etorkizuneko hirugarren lerroa bigarren ekarpenari lotuta dago, eta honako ohar honetan oinarritzen da: algoritmo guztien nahaste-matrizeak aztertzean, *RResp Atsedenean* (basala edo atsedeen neutrala) bitarteko kategoriak erronka handiagoak planteatu zituen. Atsedeen-egoera edo basal-egoera baten sailkapena problematikoagoa izan daiteke erlaxazio- eta estres-egoeren sailkapenarekin alderatuta. Hori hainbat arrazoiengatik gertatzen da eta markatzaile bereizgarriak eza da aipagarrienetako bat. Erlaxazio- eta estres-egoerak erantzun fisiologiko nabarmenagoekin eta espezifikagoekin lotuta egon ohi dira, hala nola bihotz-maiztasunaren aldaketekin, garuneko jarduerarekin edo jarduera elektrodermikoarekin. Aldiz, egoera basalak ez du ageriko aldaketarik izaten eta erantzun sotilagoak ematen ditu. Berezitasun horrek zaildu egiten du patroi bereizgarriak identifikatzea, sailkapen-prozesuaren konplexutasuna areagotuz. Horrenbestez, azterketaren etorkizuneko faseetarako, klase hori zatitzea iradokitzen da, errore-tasa hobetzeko neurri gisa.

### 7.5. Argitalpenak

Tesi-memoria hau amaitzeko, jarraian, tesiaren ikerketa-aldian aldizkarietan eta hitzaldietan argitaratutako artikuluen zerrenda dator. Zerrenda hori modu antolatuan aurkeztu da, argitalpen motaren arabera eta haren ordena kronologikoaren arabera.

#### Nazioarteko artikulua:

- N. Cívicos, M.A. Acera, A. Murueta-Goyena, N. Sagastibeltza, R. Martínez, M. Cuadrado, A. Orueta, B. Tijero, T. Fernández, R. Del Pino, I. Gabilondo, M.L. Jauregui and J.C. Gómez, “Quantitative analysis of dysautonomia in patients with autonomic dysreflexia”, *J Neurol.*, doi:10.1007/s00415-021-10478-w, PMID:33634338, vol. 268, num. 8, pp. 2985–2994, 2021.
- N. Sagastibeltza, A. Salazar-Ramirez, A. Yera, R. Martinez, J. Muguera, N. Cívicos, and M.A. Acera, “A Hierarchical Machine Learning Solution for the Non-Invasive Diagnostic of Autonomic Dysreflexia”, *Electronics*, doi:10.3390/electronics11040584, vol. 11, num. 4, pp. 584–595, 2022.
- N. Sagastibeltza, A. Salazar-Ramirez, R. Martinez, J.L. Jodra and J. Muguera, “Automatic detection of the mental state in responses towards relaxation”, *Neural Computing and Applications*, doi:10.1007/s00521-022-07435-7, pp. 5679–5696, 2023.

**Nazioarteko konferentziak:**

- N. Sagastibeltza, A. Yera, A. Salazar-Ramirez, R. Martinez and J. Muguerza, “A Preliminary Analysis of the Physiological Response Generated by Negative Thoughts”, in *CENTRIC 2020, the 13th International Conference on Advances in Human oriented and Personalized Mechanisms, Technologies, and Services*, ISBN: 978-1-61208-829-7, pp. 15–24, IARIA, 2020.
- N. Sagastibeltza, A. Salazar-Ramirez, R. Martinez, M. Martínez-Eguiluz, J. Muguerza, N. Cívicos, M. Cuadrado, and M.L. Jáuregui, “Preliminary analysis of features based on GSR/RR signals for spinal cord injury patients”, in *CBMS 2021, the 34th IEEE CBMS International Symposium on Computer-Based Medical Systems*, doi:10.1109/CBMS52027.2021.00047, pp. 426–431, IEEE, 2021.
- N. Sagastibeltza, A. Salazar-Ramirez, A. Yera, R. Martinez, J. Muguerza, N. Cívicos, and M.A. Acera, “Preliminary study on the detection of autonomic dysreflexia using machine learning techniques”, in *CSEI 2021, the 3th International Conference on Computer Science, Electronics and Industrial Engineering*, doi:10.1007/978-3-030-97719-1\_20, vol. 433, pp. 341–351, Springer, 2021.



V. Zatia

# ERANSKINAK





## 8. Kapituluia

# Disreflexia Diagnostikoaren Emaitzak eta Ondorio Medikoak

### 8.1. Emaitzak

Estandar Autonomikoak Ebaluatzeko Formularioa (ASAF) erabiliz funtzio autonomikoaren emaitzak 8.1. Taulan adierazten dira. Lagina osatzen zuten 37 pazienteetatik, bederatzi pazienteek (%24) gutxienez arrisku kardiobaskularreko faktore bat zuten. Alde batetik, nabarmentzekoa da 25 pazienteek (%67) bihotzaren kontrol autonomiko normala zutela eta 11k (%30) bradikardia. Bestalde, presio arterialaren kontrol autonomikoa normala izan zen 25 pazienterengan (%68) eta anormala 11tan (%29). Bronkio-biriketako sistemaren kontrol autonomikoa eta somatikoa normala izan zen 6 pazienterengan (%16) eta anormala beste 31 pazienterengan (%74) eta bi pazienteek aireztapen-euskarri partziala edo osoa behar izan zuten. Beheko gernu-traktuari eta heste-funtzioari dago-kienez, paziente guztiek muskulu detrusorearen jarduera areagotu zuten, eta pazienteen %78k disinergia detrusor-esfinterra zuten.

Bizkarrezur Muineko Lesioen Sailkapen Neurologikorako Nazioarteko Estandarren (ISNCSCI) arabera, C6 izan zen lesio neurologikoaren maila ohikoena proba honetan (13 paziente, %35), eta ASIaren narriadura-eskalan A izan zen 20 pazientetan, B 4tan, C 5etan, D 7tan eta E 1ean.

Disautonomia ebaluatzeko proban zehar, 5.1. Irudian erakutsia, gernu-kateter iraunkorra arrakastaz jarri zen 30 pazienterengan. Estenosi uretralak, kateterra jartzean lesioa izateko arriskuak edo kateterrarekiko intolerantziak, hipertrofiari edo muskulu detrusorearen lodierari egotz dakiokenak, zaildu egin zuten gainerako 7 pazienteetan kateterra segurtasunez erabiltzea.

8. KAPITULUA - DISREFLEXIA DIAGNOSTIKOAREN EMAITZAK ETA ONDORIO MEDIKOAK

---

**8.1. Taula:** Sintomen prebalentzia, Autonomic Standards Assessment Form (ASAF) erabiliz neurtua, gaztelaniaz baliozkotua.

Función	Función cardiovagal	Normal	25 (68 %)
Autonómica		Anormal(bradicaria)	11 (30 %)
General			1 Desconocido
	Control autonómico de la presión sanguínea	Normal	25 (68 %)
		Desconocido	1 (3 %)
		HON	9 (24 %)
		Disreflexia	9 (24 %)
	Control autonómico del sudor	Normal	14 (37 %)
		Hiperhidrosis	23 (62 %)
	Regulación temperatura	Normal	37 (100 %)
		Anormal	0 (0 %)
	Sistema respiratorio	Normal	6 (16 %)
		Soporte ventilatorio	1 (3 %)
		Soporte ventilatorio parcial	1 (3 %)
		Hiperventilación sin necesidad de soporte	29 (78 %)
Tracto urinario inferior	Conciencia de la necesidad de vaciar la vejiga	Normal	10 (27 %)
		Función reducida	6 (16 %)
		Pérdida completa de la función	21 (57 %)
	Control de esfínteres	Normal	20 (54 %)
		Función reducida	3 (8 %)
		Pérdida completa de la función	14 (39 %)
	Método vaciado vejiga	Normal	11 (30 %)
		Cateterizacion intermitente	8 (22 %)
		Reflejo	17 (46 %)
		Cateterizacion de la vejiga	1 (3 %)

Función intestinal	Control de esfínter y continencia	Normal	10 (27 %)
		Función reducida	7 (19 %)
		Pérdida completa de la función	20 (54 %)
Función sexual	Excitación física	Normal	1 (3 %)
		Función reducida	8 (22 %)
		Pérdida completa de la función	27 (73 %)
	Excitación refleja	Normal	1 (3 %)
		Función reducida	36 (97 %)
		Pérdida completa de la función	0 (100 %)
	Orgasmo	Normal	8 (22 %)
		Función reducida	4 (11 %)
		Pérdida completa de la función	23 (62 %)
	Eyacuación (hombres)	Normal	0 (0 %)
		Función reducida	27 (100 %)
		Pérdida completa de la función	0 (0 %)
Sensación Menstruación (mujeres)	Normal	0 (0 %)	
	Función reducida	4 (40 %)	
	Pérdida completa de la función	6 (60 %)	
Evaluación urodinámica	Sensación durante el llenado de vejiga	Normal	8 (22 %)
		Aumentada	0 (0 %)
		Reducida	8 (22 %)
		Ausente	21 (56 %)
	Actividad detrusora Esfínter	Hiperactiva	37 (100 %)
		Cierre Uretral normal	(%) 8 (22 %)
		Disinergia	29 (78 %)

## 8. KAPITULUA - DISREFLEXIA DIAGNOSTIKOAREN EMAITZAK ETA ONDORIO MEDIKOAK

Daren intzidentzia orokorra %73.3koa izan zen. Paziente batengan maskuriko zunda jartzeak berak eragin zuen DA, eta 8 pazientek ez zituzten DA irizpideak betetzen. DA duten eta ez duten pazienteen parametro demografikoak eta klinikoak 8.2. Taulan adierazten dira.

**8.2. Taula:** Demografia, datu klinikoak eta neurketa autonomikoak, disreflexia autonomikoa duten eta ez duten BMLko pazienteei dagokienez.

		DA ( <i>n</i> =22)	No DA ( <i>n</i> =8)	<i>p</i> value	
Edad (años)		44.4(14.4)	38.9(12.5)	ns	
Sexo	Hombre	14	7	ns	
	Mujer	8	1	ns	
Variables relacionadas con la enfermedad	Edad cuando LME (años)	33.27(15.31)	33.50(15.92)	ns	
	Tiempo desde LME (meses)	124.7(145.8)	75.1(131.9)	ns	
	Síntomas:				
	Asintomático	14		ns	
	Sintomático	8	0	ns	
	Nivel lesión:				
	Cervical	21	5	0.04	
	Torácica	1	3	0.04	
	Lesión funcional:				
	Tetraplejia	21	5	0.04	
Paraplejia	1	3	0.04		
ASIA ( <i>n</i> º de pacientes)		19(A,B) 3(C,D,E)	3(A,B) 5(C,D,E)	0.02 0.02	
Parámetros autonómicos en reposo	SBP Basal(mmHg)	109.2(19.4)	106.9(5.6)	ns	
	DBP Basal(mmHg)	71.4(5.3)	70.1(16.1)	ns	
	HR(latido/min)	65.1(8.1)	58.5(8.9)	ns	
	BRS(ms/mmHg)	16.2(9.8)	10.5(4.5)	ns	
	LF-SBP(mmHg)	1.88(3.3)	2.31(2.13)	ns	
	HF RRR(s)	1036.4(2599.5)	210.9(238.7)	ns	
Relación LF/HF		0.97(0.57)	1.91(1.4)	0.02	
Maniobra de Valsalva	Relación Valsalva	1.11(0.21)	1.25(0.29)	ns (%)	
	Disminución del SBP fase II	1.6(13.7)	10.9(13.7)	ns (%)	
	Aumento del SBP fase IV	1.14(16.5)	8.4(16.5)	ns (%)	

		DA ( $n=22$ )	No DA ( $n=8$ )	$p$ value
Concentración	Noradrenalina supino	100.9(135.6)	209.6(109.6)	0.008)
plasmática de	Noradrenalina vertical	158.0(248.2)	515.8(338.8)	0.005
catecolaminas	Adrenalina supino	25.8(53.9)	13.4(3.4)	ns
y hormonas	Adrenalina vertical	16.6(5.4)	18.3(8.3)	ns
	Dopamina supino	10.8(2.9)	10.3(1.0)	ns
	Dopamina vertical	12.9(5.6)	15.7(11.2)	ns
	Vasopresina supino	4.2(4.4)	5.6(4.6)	ns
	Vasopresina vertical	5.0(2.8)	6.9(5.3)	ns
Mesa Basculante	HON:			
	Si	12	0	0.02
	No	22	8	0.02

DA disreflexia autonomikoa, ASIA American Spinal Injury Association Impairment Scale, DBP presio arterial diastolikoa, HF goi-maiztasuna, LF baxu maiztasuna, NA noradrenalina, HON hipotentsio ortostatiko neurogenikoa, *ns* ez esanguratsua, RRI RR tartea, PAS presio arterial sistolikoa, LME (BML) bizkarrezur-muineko lesioa, BRS barorreflejoaren sentsibilitatea (barorreflejoaren irabazia ere esaten zaio, milisegundoetan (ms) taupaden arteko tartearen aldaketa gisa definitua, batezbesteko presio arterialeko aldaketa-unitate bakoitzeko).

8.2. Taulan agertzen den bezala, DA duten 22 pazienteetatik, 14 sintomarik gabekoak izan ziren (%63.6), eta sintomak jakinarazi zituztenak, berriz, izerditzea handitzeaz (4 paziente), buruko minaz (2 paziente) eta hotzikaraz (2 paziente) kexatu ziren. Lesioaren mailari dagokionez, DA episodio bat gertatu zen BML zerbikala zuten pazienteen %81ean, hau da, lesio mota hori duten 26 pazienteetatik 21ean, baina BMLa zuten pazienteen %25ean (lesioa maila horretan duten 4 pazienteetatik bat) baino ez zen sortu patologia horretako gertakari bat.

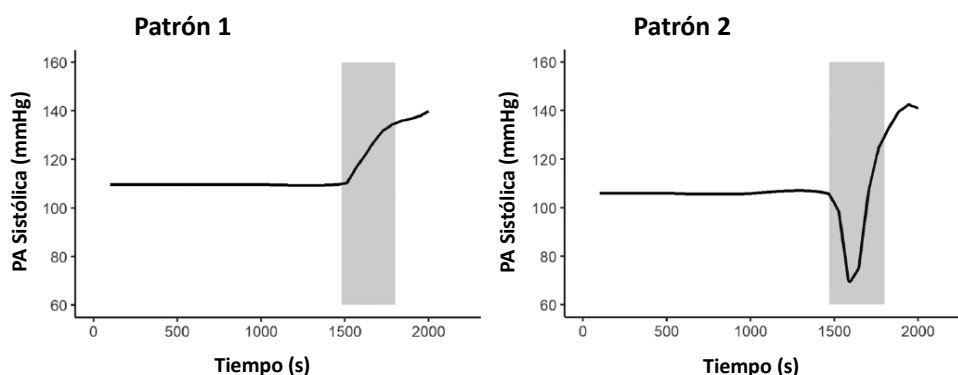
DA izan zuten pazienteen artean, PASaren batezbesteko igoera  $38.6 \pm 14.3$  mmHg-koa izan zen; DARik gabeko pazienteen artean, berriz,  $10.3 \pm 7.2$  mmHg-koa. 8.2. Taulan ikus daitekeenez, presio arterial sistoliko eta diastoliko basala eta bihotz-maiztasuna konparagarriak izan ziren bi taldeen artean. Korrelazio bat egon zen presio sistoliko maximoaren magnitudearen eta BMLtik hasi eta hilabeteetako denboraren artean ( $p = 0.52$ ;  $p = 0.004$ ). Maskuriko betetzean, BML akutua zuten pazienteen %50ek DA aurkeztu zuten; BML kronikoa zuten pazienteen kasuan, berriz, %88.9k garatu zuten patologia hori. Gainera, DAA ASIA A edo B narriadura-puntajeak zituzten pazienteen %86an erori zen, baina soilik ASIA C, D edo E puntuazioak zituzten pazienteen %37.5ean ( $p = 0.02$ ).

BML zuten eta DA zuten pazienteen proportzioa handiagoa izan zen emakumeen artean gizonen artean baino (%88.9 eta %66.7, hurrenez hurren), baina

## 8. KAPITULUA - DISREFLEXIA DIAGNOSTIKOAREN EMAITZAK ETA ONDORIO MEDIKOAK

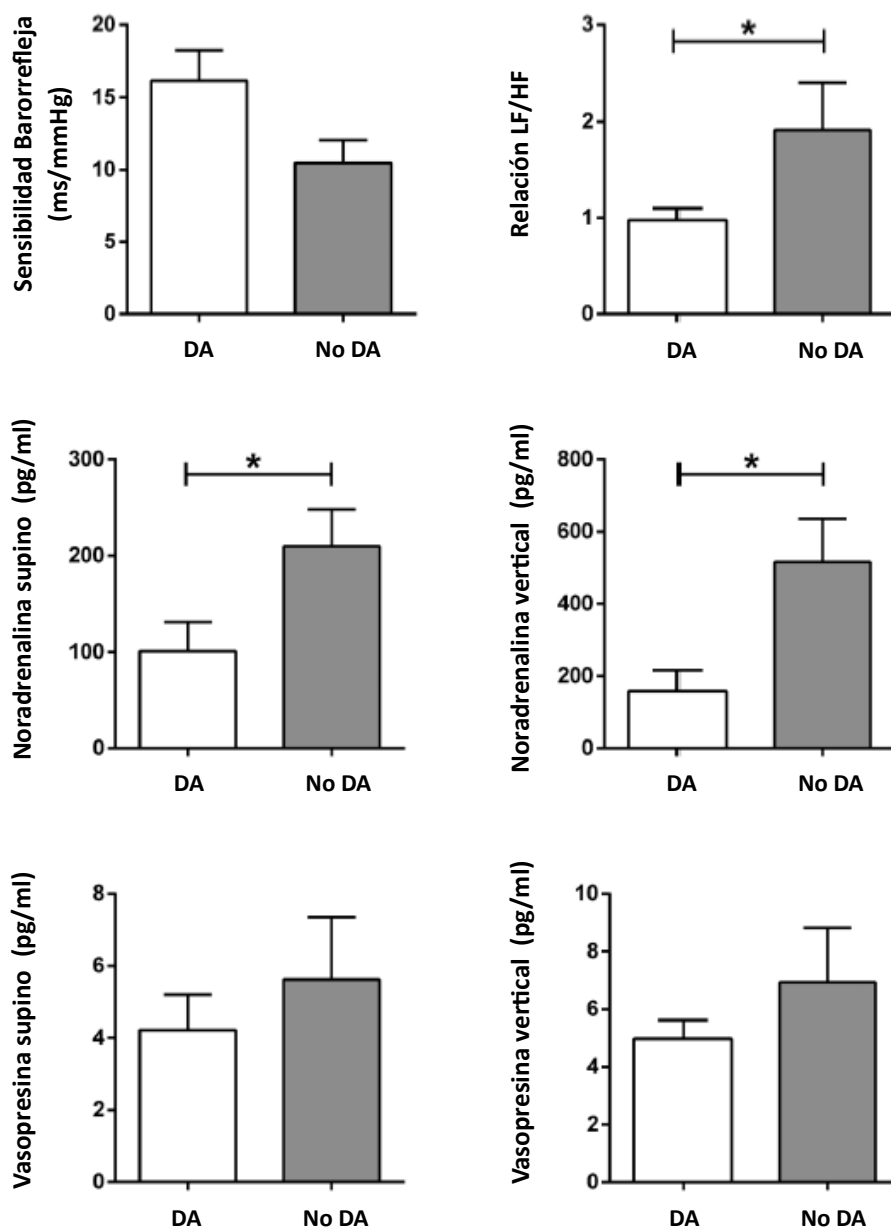
alde hori ez zen esanguratsua izan ( $p = 0.30$ ). Azterlanean sartu zirenean, BML eta DA zuten gizonak pazienteak gazteagoak ziren ( $38,6 \pm 14,0$  urte) emakumeak baino ( $52.8 \pm 13.7$  urte,  $p = 0.05$ ). Joera hori berbera da BML diagnostikatzen den unean (gizonak  $26.1 \pm 9.2$  eta emakumeak  $46.1 \pm 16.4$  urte,  $p = 0.06$ ). Hala ere, lesioaren etapa ( $p = 0.40$ ) eta ASIA puntuazioaren proportzioa antzekoak izan ziren talde horien artean ( $p = 0.69$ ).

Maskuriko betetzean, presio arteriala handitzeko bi patroia desberdin ikusi ziren; ikusi 8.1. Irudia. 21 pazienterengan presio arterialaren pixkanakako igoera hauteman zen (1. patroia). 9 pazienteren kasuan, presio arteriala gutxitu egin zela ikusi zen, eta maskuria betetzeko prozesua amaitu ondoren handitu egin zela, V formako uhin-forma bat eratuz (2. eredua). 2. patroia zuten pazienteak gazteagoak ziren ( $35.2 \pm 9.0$  urte) 1. patroikoak baino ( $46.4 \pm 14.6$  urte,  $p = 0.046$ ), baina aldeak aurkitu ziren DA tasan talde horien artean.



**8.1. Irudia:** Presio arteriala handitzeko eredua, gatz disoluzioarekin maskuria betetzen den bitartean,  $37^{\circ}\text{C}$ -tan (itzal grisa). 1. eremuan, betetzean presio arteriala pixkanaka handitzen ari zela ikusi zen. 2. eremuan, presio arteriala gutxitu egin zela ikusi zen, eta maskuria betetzeko prozesua amaitu ondoren handitu egin zela, V formako uhina sortuz.

Atsedenean dauden parametro autonomikoei dagokienez, barohartzaileen sentibilitatea handiagoa izan zen DA garatu zuten pazienteetan, garatu ez zutenekin alderatuta, nahiz eta alde hori estatistikoki esanguratsua ez izan, ikusi 8.2. Taula eta 8.2. Irudia. Analisi espektralak ez zuen desberdintasunik erakutsi bihotz-maiztasunaren aldakortasunean (HF-RR), ezta presio arterialean ere (LF-DBP), baina bai LF/HFan, eta DA duten pazienteetan DARik gabekoe-tan baino erlazio txikiagoa ikusi zen (8.2. Taula, 8.2. Irudia).



**8.2. Irudia:** Erreflexu barohartzailearen sentsibilitatea neurketa atsedenean, oreka sinbobagala eta noradrenalina eta basopresina zinetikoa, disreflexia autonomikoarekiko eta gabeko bizkarrezur-muineko lesioa duten pazienteengan. Datuak  $\pm$  SEM batezbesteko gisa adierazten dira, eta \*k estatistikoki esanguratsua den aldea adierazten du:  $p < 0.05$ . DA disreflexia autonomikoa, maiztasun baxuko/maiztasun handiko LF/HF erlazioa.

## 8. KAPITULUA - DISREFLEXIA DIAGNOSTIKOAREN EMAITZAK ETA ONDORIO MEDIKOAK

---

Analisi hormonalari buruzko esperimentazioaren zatitik lortutako emaitzak 8.2. Taulan eta 8.2. Irudian ikus daitezke. Nabarmentzekoa da noradrenalina-mailetan alde esanguratsuak hauteman zirela, eta DA duten pazienteetan baxuagoak izan zirela supina posizioan dauden DA ez duten pazienteetan ( $p = 0.008$ ) eta buruaren inklinazioan ( $p = 0.005$ ) baino. Supino-noradrenalinare mailen igoera posizio tentean nabarmen txikiagoa izan zen DA duten pazienteen artean, halakorik ez zutenen artean baino ( $p < 0.001$ ). Ez zen desberdintasun esanguratsurik ikusi dopamina, adrenalina edo basopresina kontzentrazioetan talde horien artean.

Probaren amaieran, mahai baskulatzailleak, DA zuten BMLko pazienteen %55ek HON aurkeztu zuen, baina DA gabeko BML zuten pazienteetako batek ere ez zuen HON izan ( $p = 0.01$ ). Ez zen alderik aurkitu bihotz-maiztasunaren eta presio arterialaren aldakortasunean HON duten eta ez duten pazienteen artean, baina LF/HF zatidura nabarmen txikiagoa izan zen HON duten pazienteetan ( $0.82 \pm 0.63$  vs.  $1.4 \pm 1.0$ ,  $p = 0.036$ ), eta BRS handiagoa izan zen (HON  $19.6 \pm 11.9$  vs. ez HON  $12.6 \pm 9.1$ ,  $p = 0.022$ ). Noradrenalina, basopresina eta dopamina supina edo bertikalean zeuden mailak konparagarriak izan ziren HON duten eta ez duten pazienteen artean.

### 8.2. Ondorioak

Ekarpen horretan azaldutako esperimentaziorako, BMLa zuten 37 paziente bildu ziren, gehienak BML zerbikala zutenak, eta maskuria modu kontrolatuan betetzeak eragindako DA prebalentzia handia egiaztatu zen.

Hau da DA duten BML duten pazienteek LF/HF erlazio baxuagoa aurkeztu zutela autonomiko probetan atsedenean, eta noradrenalina-maila txikiagoa, DArrik gabeko BML duten pazienteekin alderatuta. Gainera, DA duten pazienteen erdiek hipotentsio ortostatiko neurogeniko berantiarra izan zuten.

Ondo dokumentatu da DArko gertakariak ohikoagoak direla BMLa T6 mailan edo maila handiagoan duten pazienteetan, eta DAr okerrera egiten duela denborarekin, eta gertakariak ohikoagoak eta muturrekoagoak bihurtzen direla, eta hori lortutako emaitzekin berresten da.

Funtzio autonomiko ez-inbaditzaileko probei dagokienez, nerbio-sistema autonomoa ebaluatu zen BML duten pazienteen ohiko proba klinikoen bidez, funtzio autonomiko sinpatikoa eta kardiobaskularra ebaluatzeko, konplikazio potentzialki kaltegarriak prebenitzeko, hala nola DA. Egiaztatu zen DA zuten pazienteek beherakada nabarmena zutela LF/HF erlazioan atsedenean, eta noradrenalinare maila baxua plasman, buruaren inklinazioan noradrenalinare igoera txiki batekin. Gao et al. [186] aldizkariaren emaitzen arabera, BMLa zuten subjektuak noradrenalina-isuri txikiagoa aurkeztu zuen atsedenean, desgaitasunik gabeko subjektuekin alderatuta, horiek Krum et al. [187]-ren aurreko emaitzak berretsi baitzituzten.

Hala ere, ez zituzten BMLko pazienteak DA zuten eta ez zutenekin alderatu. Lortutako emaitzek ebidentzia berri bat ematen dute, eta horrek BRSa DA



duten BMLko pazienteen artean egonean handitzen dela bermatzen du, DA ez duten pazienteen aldean. Beraz, DA duten pazienteek sistema barorreflejo sentikorragoa erakusten dute, DARik ez duten pazienteekin alderatuta presio arterialaren aldaketa berari modu handiago eta azkarragoan erantzuten diona. Horrek azal lezake partzialki LF/HF erlazio murriztua DA atsedenean duten pazienteetan; izan ere, barohartzaileen sentibilitatea handitzeak irteera-fluxu lauso handiagoa ekarriko luke, trafiko sinpatiko eferentea gutxituz eta, ondorioz, oreka sinpatobagala murriztuz.

Hipotentsio ortostatikoari dagokionez, mahai baskulatuaren probak iraun zuen bitartean ( $60^\circ$ ), pazienteen %55ek HON garatu zuten, eta horietatik %92k BML kronikoa zuten. HON zuten paziente gehienek BML kronikoa zuten, eta guztiek zuten DA. Hala ere, DA zuten pazienteen %60k soilik zuten HON. HON zuten pazienteetan, BRSa handiagoa izan zen eta LF/HF erlazio txikiagoa, baina ez zen alderik aurkitu bihotz-maiztasunaren (HF) eta presio arterialaren aldakortasuneari HON duten eta ez duten pazienteen artean. Ikusi zen noradrenalinaren mailak txikiagoak izan zirela DAa eta HONa zuten pazienteetan, HONik gabeko pazienteekin alderatuta. Oro har, aurkikuntza horiek akats sinpatiko bat iradokitzen dute. Akats hori handiagoa izan zen HON eta DA izan zituzten BMLko pazienteetan. Emaitzetan oinarrituta, HONen presentzia modu esanguratsuan erlazionatu zen DArekin; hala ere, HONen faltak ez zuen baztertu DA esperimentatzeko aukera, eta horrek HON falta DArako iragartzeko aldagai urri gisa planteatzen du.

Aurkikuntza interesgarri eta berritzaile bat maskuria betetzeko prozesuan presio arteriala handitzeko bi eredu mota agertzea izan zen. Lehen patroia klasikoa izan zen, presio arterialaren pixkanakako igoerarekin eta erreflexu barohartzailearen estimulazioaren ondorioz bihotz-maiztasunaren erorketarekin. Bigarren patroiararen ezaugarria presio arterialaren hasierako jaitsiera izan zen, eta, ondoren, gorakada bat izan zen, eta paziente gazteagoetan hauteman zen. Horregatik ondoriozta daiteke bizkarrezur-muineko aldaketa plastikoak adinaren araberakoak direla [188].

Egindako esperimentazioak muga batzuk ditu. Lehenik eta behin, laginaren tamaina txikia eta desorekatua izan zen DArekin presentziari dagokionez, eta, beraz, batezbesteko aldagai batzuk desberdinak izan ziren, baina ez esanguratsuak. Bigarrenik, proba autonomiko batzuk ezin izan ziren egin, arnas muskuluen funtzioa BMLa duten pazienteengan kaltetuta dagoelako. Ondorioz, ez zen egin funtzio kardiobaskularraren proba klinikorik, eta, beraz, ezin izan zen aztertu bihotz-maiztasunaren aldakortasuna arnasketa sakonarekin. Ondoriozta daiteke pazienteek proba jakin batzuen aurrean zuten hauskortasunak eta laginaren tamaina txikiak eragotzi zutela parametro autonomikoak mozteko balioak ematea, DA duten eta ez duten pazienteak bereizteko.

Laburbilduz, ekarpen honetan aurkeztutako lanak DA duten BMLko pazienteen huts autonomikoaren irudi orokorra definitzen du. Horretarako, parametro autonomikoak erabiltzen dira, taupadaz taupadako monitoreo hemodinamiko baten bidez neurtutako atsedenaldira luze baten ondoren. Kapitulu honetako 8.1. Atalean azaldutako emaitzen arabera, egiaztatu da DA duten pazienteek irteera-fluxu sinpatiko txikia erakutsi zutela atsedenean, noradrenalinaren mai-

## 8. KAPITULUA - DISREFLEXIA DIAGNOSTIKOAREN EMAITZAK ETA ONDORIO MEDIKOAK

---

la plasmatico baxuagoen arabera neurtuta, LF/HF erlazio murriztua eta SBR areagotua, baina atsedenean dauden presio arterial eta bihotz-maiztasun konparagarriekin.

# Bibliografía

- [1] World Health Organization, “Preamble to the constitution of the world health organization as adopted by the international health conference, new york: World health organization, 19-22 june, 1946,” in *Constitution of the World Health Organization* (W. H. Organization, ed.), World Health Organization, 1948. Accessed: 21.03.2017. [http://whqlibdoc.who.int/hist/official\\_records/constitution.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hist/official_records/constitution.pdf).
- [2] A. Salazar-Ramirez, E. Irigoyen, R. Martinez, and U. Zalabarria, “An enhanced fuzzy algorithm based on advanced signal processing for identification of stress,” *Neurocomputing*, vol. 271, pp. 48–57, jan 2018.
- [3] M. S. Salim, M. Mazlan, and N. Hasnan, “Intracerebral haemorrhage following uncontrolled autonomic dysreflexia post suprapubic catheter placement surgery,” *Spinal Cord Series and Cases*, vol. 3, jul 2017.
- [4] M. Vírseda-Chamorro, J. Salinas-Casado, P. Gutiérrez-Martín, M. de la Marta-García, A. López-García-Moreno, and M. E. Fuertes, “Risk factors to develop autonomic dysreflexia during urodynamic examinations in patients with spinal cord injury,” *Neurourology and Urodynamics*, vol. 36, pp. 171–175, oct 2015.
- [5] L. C. Weaver, J. C. Fleming, C. J. Mathias, and A. V. Krassioukov, “Disordered cardiovascular control after spinal cord injury,” in *Handbook of Clinical Neurology*, pp. 213–233, Elsevier, 2012.
- [6] H. Sharif and S. Hou, “Autonomic dysreflexia: a cardiovascular disorder following spinal cord injury,” *Neural Regeneration Research*, vol. 12, no. 9, p. 1390, 2017.
- [7] R. Rodríguez-Herrera, R. J. Losardo, and O. Binvignat, “La anatomía humana como disciplina indispensable en la seguridad de los pacientes,” *International Journal of Morphology*, vol. 37, no. 1, pp. 241–250, 2019.
- [8] Mayo Foundation for Medical Education and Research (MF-MER)., “Sweat glands.” <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/hyperhidrosis/multimedia/sweat-glands/img-20007980>.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [9] NIH: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases, “Vías urinarias,” Mar. 2017. <https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la-salud/enfermedades-urologicas/infecciones-vejiga/definicion-hechos>.
- [10] D. Lemus, M. Fuenzalida, and C. Rosas, “Urinary tract development,” *International Journal of Medical and Surgical Sciences*, vol. 2, pp. 447–454, oct 2018.
- [11] Colaboradores de Wikipedia, “Músculo detrusor de la vejiga.” Editor: Wikipedia, La enciclopedia libre., 2021. [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%BAsculo\\_detrusor&oldid=136197725](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%BAsculo_detrusor&oldid=136197725).
- [12] L. Hirsch, “El bazo y el sistema linfático.” Nemours TeensHealth, 2019. [https://kidshealth.org/es/teens/spleen.html#:~:text=Las%20funciones%20del%20sistema%20linf%C3%A1tico,sustancias\)%20por%20todo%20el%20cuerpo](https://kidshealth.org/es/teens/spleen.html#:~:text=Las%20funciones%20del%20sistema%20linf%C3%A1tico,sustancias)%20por%20todo%20el%20cuerpo).
- [13] “Sistema circulatorio.” Biblioteca de Investigaciones, 2021. <https://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com/biologia/sistemas-y-aparatos-del-cuerpo-humano/sistema-circulatorio/comment-page-1/>.
- [14] O. Universidad Rice, “Conceptos de biología: Sistemas circulatorio y respiratorio.” <https://openstax.org/books/concepts-biology/pages/16-3-circulatory-and-respiratory-systems>.
- [15] I. Lugones, “Sistema circulatorio.” <https://www.cardiocongenitas.com.ar/corazon-normal>.
- [16] L. Macías and Colaboradores de Wikimedia Commons, “El corazón humano,” 2020. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:El\\_coraz%C3%B3n\\_humano\\_-\\_Laura\\_Mac%C3%ADas\\_%C3%81lvarez.jpg&oldid=503915184](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:El_coraz%C3%B3n_humano_-_Laura_Mac%C3%ADas_%C3%81lvarez.jpg&oldid=503915184).
- [17] Comisión Honoraria para la Salud Cardiovascular, “Cómo funciona tu corazón: La estructura del corazón humano,” 2022. <http://cardiosalud.org/corazon-y-salud/como-funciona-tu-corazon/>.
- [18] Manual Merck, “Estructura típica de una neurona,” 2022. <https://www.merckmanuals.com/es-us/hogar/traumatismos-y-envenenamientos/traumatismos-craneales/lesi%C3%B3n-axonal-difusa>.
- [19] Dolopedia, “Sistema nervioso central.” <https://dolopedia.com/categoria/sistema-nervioso-central>.
- [20] iStock by Getty images, “Sistema nervioso periférico,” 2021. <https://www.istockphoto.com/es/vector/%C3%B0sistema-nervioso-entral-gm1345408602-423493032>.

- 
- [21] G. WH, *The involuntary nervous system*. London: Longmans Green, 1916.
- [22] L. JN, *Langley JN*. Cambridge: W Heffer and Sons, 1921.
- [23] E. Crosby, T. Humphrey, and E. Lauer, *Correlative anatomy of the nervous system*. New York: MacMillan, 1962.
- [24] S. Muñoz, “Funciones del sistema nervioso autónomo: Sistema simpático y parasimpático,” 2022. <https://www.psicoadactiva.com/blog/sistema-nervioso-autonomo-simpatico-parasimpatico/>.
- [25] Quirosum, “Cómo afectan tus emociones a tu sistema inmune: Sistema nervioso autónomo,” 2020. <http://www.quirosum.es/emociones-sistema-nervioso-inmune/>.
- [26] Instituto Guttmann, “Lesión medular,” 2019. <https://www.guttmann.com/es/treatment/lesion-medular>.
- [27] C. R. West, J. W. Squair, L. McCracken, K. D. Currie, R. Somvanshi, V. Yuen, A. A. Phillips, U. Kumar, J. H. McNeill, and A. V. Krassioukov, “Cardiac consequences of autonomic dysreflexia in spinal cord injury,” *Hypertension*, vol. 68, pp. 1281–1289, nov 2016.
- [28] M. E. Hubbard, A. A. Phillips, R. Charbonneau, J. W. Squair, A. M. Parr, and A. Krassioukov, “PRES secondary to autonomic dysreflexia: A case series and review of the literature,” *The Journal of Spinal Cord Medicine*, vol. 44, pp. 606–612, may 2019.
- [29] De Andrés Muñoz, S., *Disreflexia autónoma: un reto de la enfermería actual.*, vol. 6. 2014. <http://revistareduca.es/index.php/reduca-enfermeria/article/view/1718>.
- [30] M. S. K. T. C. (MSKTC), “Autonomic dysreflexia.” 2015. [https://msktc.org/lib/docs/Factsheets/Spanish\\_Factsheets/SCI\\_Auto\\_Dysreflexia\\_Sp.pdf](https://msktc.org/lib/docs/Factsheets/Spanish_Factsheets/SCI_Auto_Dysreflexia_Sp.pdf).
- [31] J.-M. J., *Disreflexia autonómica*. Rev Mex Anest, 2017.
- [32] J. Furlan, “Disreflexia autónoma después de mielitis aguda debido a neuromielitis óptica.” 2018. <https://www.portalamlar.org/2020/01/26/disreflexia-autonoma-despues-de-mielitis-aguda-debido-a-neuromielitis-optica/>.
- [33] Craig Hospital. Colorado, “Autonomic dysreflexia,” 2015. <https://craighospital.org/resources/autonomic-dysreflexia>.
- [34] N. Liu, M. Zhou, F. Biering-Sørensen, and A. V. Krassioukov, “Iatrogenic urological triggers of autonomic dysreflexia: a systematic review,” *Spinal Cord*, vol. 53, pp. 500–509, mar 2015.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [35] T. T. Roberts, G. R. Leonard, and D. J. Cepela, “Classifications in brief: American spinal injury association (ASIA) impairment scale,” *Clinical Orthopaedics*, vol. 475, pp. 1499–1504, may 2017.
- [36] H. L. Frankel and C. J. Mathias, “Cardiovascular aspects of autonomic dysreflexia since guttmann and whitteridge (1947),” *Spinal Cord*, vol. 17, pp. 46–51, may 1979.
- [37] K. Shouman and E. E. Benarroch, “Segmental spinal sympathetic machinery,” *Neurology*, vol. 93, pp. 339–345, jul 2019.
- [38] M. Walter, S. C. Knüpfer, J. J. Cragg, L. Leitner, M. P. Schneider, U. Mehnert, A. V. Krassioukov, M. Schubert, A. Curt, and T. M. Kessler, “Prediction of autonomic dysreflexia during urodynamics: a prospective cohort study,” *BMC Medicine*, vol. 16, apr 2018.
- [39] R. Lindan, E. Joiner, A. A. Freehafer, and C. Hazel, “Incidence and clinical features of autonomic dysreflexia in patients with spinal cord injury,” *Spinal Cord*, vol. 18, pp. 285–292, oct 1980.
- [40] E. Koyuncu and M. Ersoz, “Monitoring development of autonomic dysreflexia during urodynamic investigation in patients with spinal cord injury,” *The Journal of Spinal Cord Medicine*, vol. 40, pp. 170–174, apr 2016.
- [41] C. Pigrau, “Infecciones del tracto urinario nosocomiales,” *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, vol. 31, pp. 614–624, nov 2013.
- [42] J. J. Cragg, V. K. Noonan, A. Krassioukov, and J. Borisoff, “Cardiovascular disease and spinal cord injury: Results from a national population health survey,” *Neurology*, vol. 81, pp. 723–728, jul 2013.
- [43] J.-C. Wu, Y.-C. Chen, L. Liu, T.-J. Chen, W.-C. Huang, H. Cheng, and S. Tung-Ping, “Increased risk of stroke after spinal cord injury: A nationwide 4-year follow-up cohort study,” *Neurology*, vol. 78, pp. 1051–1057, feb 2012.
- [44] K. Allen and S. Leslie, “Disreflexia autonómica.” StatPearls, 2022. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482434/>.
- [45] D. Goleman, *Emotional intelligence*. 2010. <https://editorialkairos.com/catalogo/inteligencia-emocional>.
- [46] M. A. Peláez-Fernández, L. Rey, and N. Extremera, “Pathways from emotional intelligence to well-being and health outcomes among unemployed: Mediation by health-promoting behaviours,” *Journal of Health Psychology*, vol. 27, no. 4, pp. 879–889, 2020.
- [47] A. Baraybar-Fernández, M. Baños-González, Ó. Barquero-Pérez, R. Goya-Esteban, and A. de-la Morena-Gómez, “Evaluation of emotional responses to television advertising through neuromarketing,” *Comunicar*, vol. 25, no. 52, pp. 19–28, 2017.

- 
- [48] G. Grzib, B. García, and J. L. Fernández, “Emoción y conducta: estudio de la emoción desde un punto de vista conductual en humanos,” *Revista de psicología general y aplicada: Revista de la Federación Española de Asociaciones de Psicología*, vol. 42, no. 1, pp. 11–22, 1988.
- [49] Aristóteles, “Rhetoric.” [https://es.wikipedia.org/wiki/Ret%C3%B3rica\\_\(Arist%C3%B3teles\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Ret%C3%B3rica_(Arist%C3%B3teles)).
- [50] W. James, *The principles of psychology, Vol I*. Henry Holt and Co, 1890.
- [51] M. Chóliz, “Psicología de la emoción: el proceso emocional,” *Universidad de Valencia*, vol. 3, 2005.
- [52] P. Ekman, *Emotion in the Human Face*. Elsevier, 1972.
- [53] A. Damasio, *Y el cerebro creó al hombre*. 2010.
- [54] W. Cannon, “The receptive relaxation of the stomach,” *American Journal of Physiology*, vol. 29, pp. 267,273, 1911.
- [55] W. Cannon, “Stresses and strains of homeostasis,” *The American Journal of the Medical Sciences*, pp. 13–14, 1935.
- [56] H. Selye, “The general adaptation syndrome and the diseases of adaptation,” *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, vol. 6, no. 2, pp. 117–230, 1946.
- [57] L. Angel, “Influencia de las variables socio-demográficas y laborales de estrés determinados con el modelo desequilibrio esfuerzo recompensa de siegrist.,” 11 2017.
- [58] H. Selye, *The stress of life*. 1956.
- [59] R. Lázaro, “El estrés psicológico y el proceso de afrontamiento.,” 1966.
- [60] H. Selye, “On the real benefits of eustress,” *Psychology Today*, vol. 11, pp. 60–70, 1978.
- [61] R. Sapolsky, *Why Zebras Don't Get Ulcers*. Holt Paperbacks, 1994.
- [62] G. Mark, D. Gudith, and U. Klocke, “The cost of interrupted work,” 2008.
- [63] George Marios and Kalatzantonakis Jullien, “Automatic stress detection using speech and advanced machine learning methods,” 2021.
- [64] F. Albertetti, A. Simalastar, and A. Rizzotti-Kaddouri, “Stress detection with deep learning approaches using physiological signals,” pp. 95–111, 2021.
- [65] G. Vos, K. Trinh, Z. Sarnyai, and M. R. Azghadi, “Generalizable machine learning for stress monitoring from wearable devices: A systematic literature review,” 2022.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [66] Maund, Irvine, Reeves, Strong, Cromie, Dallimer, and Davies, "Wetlands for wellbeing: Piloting a nature-based health intervention for the management of anxiety and depression," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, no. 22, p. 4413, 2019.
- [67] H. Benson, J. F. Beary, and M. P. Carol, "The relaxation response," *Psychiatry*, vol. 37, no. 1, pp. 37–46, 1974.
- [68] I. Rosdiana and Y. Cahyati, "The effect of the progressive muscle relaxation combined with lavender aromatherapy on insomnia of hemodialysis patients," *Enfermería Nefrológica*, vol. 24, no. 1, pp. 39–46, 2021.
- [69] D. M. Mirvis and A. L. Goldberger, *Electrocardiography*. 2001.
- [70] H. J. Wellens and A. P. Gorgels, "The electrocardiogram 102 years after einthoven," *Circulation*, vol. 109, pp. 562–564, feb 2004.
- [71] P. Kligfield, L. S. Gettes, J. J. Bailey, R. Childers, B. J. Deal, E. W. Hancock, G. van Herpen, J. A. Kors, P. Macfarlane, D. M. Mirvis, O. Pahlm, P. Rautaharju, and G. S. Wagner, "Recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram," *Journal of the American College of Cardiology*, vol. 49, pp. 1109–1127, mar 2007.
- [72] "Ecg electrode imágenes de stock," 2022. <https://www.alamy.es/imagenes/ecg-electrode.html?page=3&sortBy=relevant>.
- [73] Urgencias y Emergencias, "Las derivaciones del electrocardiograma," 2022. [https://www.urgenciasyemergen.com/derivaciones-del-electrocardiograma-iii\\_4/](https://www.urgenciasyemergen.com/derivaciones-del-electrocardiograma-iii_4/).
- [74] T. Cascino and M. Shea, "Electrocardiografía: Componentes tradicionales del ecg." Manual MSD, 2021. <https://www.msdmanuals.com/es/professional/trastornos-cardiovasculares/pruebas-y-procedimientos-cardiovasculares/electrocardiograf%C3%ADa>.
- [75] M. Olmo and R. Nave, "Physiology and biophysics of the circulation." <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Fluids/bloodpres.html>.
- [76] W. Boucsein, *Electrodermal Activity*. Springer US, 2012.
- [77] L. Klot and J. McCulloch, "Promotion of wound healing with electrical stimulation.," *NIH. Adv Wound Care.*, vol. 9, no. 5, pp. 5–42, 1996.
- [78] M. Sandoval and E. Herrera, "Electric stimulation effects on injuries healing processes," *Rev. Univ. Ind. Santander, Salud*, vol. 39, no. 1, pp. 51–58, 2006.



- 
- [79] L. Poltawski and T. Watson, "Bioelectricity and microcurrent therapy for tissue healing – a narrative review," *Physical Therapy Reviews*, vol. 14, pp. 104–114, apr 2009.
- [80] M. E. Moncada and J. de la Cruz, *Electrodermal activity*, vol. 31. Scielo. Ingeniería e investigación, 2011.
- [81] K. Hugdahl, *Psychophysiology: The mind-body perspective*. United States: Harvard University Press, 1995.
- [82] M. Najström and B. Jansson, "Skin conductance responses as predictor of emotional responses to stressful life events," *Behaviour Research and Therapy*, vol. 45, pp. 2456–2463, oct 2007.
- [83] T. Reinhardt, C. Schmahl, S. Wüst, and M. Bohus, "Salivary cortisol, heart rate, electrodermal activity and subjective stress responses to the mannheim multicomponent stress test (MMST)," *Psychiatry Research*, vol. 198, pp. 106–111, jun 2012.
- [84] A. De Sierra, C. Sánchez-Ávila, J. Guerra-Casanova, and G. Bailador, "Real-time stress detection by means of physiological signals," in *Recent Application in Biometrics*, InTech, jul 2011.
- [85] C.H. Monge Rodríguez, "The effect of induced electrode conductance drop in the bidactilarcircuit: Preconceiving its technical name and explaining its scientific causes," *Visión Criminológica Criminalista*, 2017.
- [86] W. Kelley, *Medicina interna*, vol. 1. 1992.
- [87] L. D. Bolanos, J. M. Vicente, O. A. Vivas, and J. M. Sabater-Navarro, "Electrodermal activity in relation to diabetes, autonomic neuropathy and aging: a preliminary study," *Ingeniería e Investigación*, vol. 39, pp. 27–33, sep 2019.
- [88] J. E. Ochoa M, J. G. McEwen O, and D. Aristizábal O, "Principles of non-invasive hemodynamic assessment with impedance cardiography," *Revista Colombiana de Cardiología*, vol. 16, pp. 91 – 102, 06 2009.
- [89] R. L. Summers, W. C. Shoemaker, W. F. Peacock, D. S. Ander, and T. G. Coleman, "Bench to bedside: Electrophysiologic and clinical principles of noninvasive hemodynamic monitoring using impedance cardiography," *Academic Emergency Medicine*, vol. 10, pp. 669–680, jun 2003.
- [90] H. J. C. Swan, W. Ganz, J. Forrester, H. Marcus, G. Diamond, and D. Chonette, "Catheterization of the heart in man with use of a flow-directed balloon-tipped catheter," *New England Journal of Medicine*, vol. 283, pp. 447–451, aug 1970.
- [91] K. R. S. Lailu Mathews, *Swan-ganz catheter in hemodynamic monitoring.*, vol. 22. J Anaesth ClinPharmacol, 2006.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [92] W. Kubicek, J. Karnegis, R. Patterson, D. Witsoe, and R. Mattson, *Development and evaluation of an impedance cardiac output system.*, vol. 37. Aersp Med, 1966.
- [93] N. W. Winter UJ KR, Kubicek WG, “Thoracic impedance measurements in clinical cardiology,” *Thieme Medical Publishers*, 1994.
- [94] M. Minsky, J. McCarthy, and C. Shanon, “Conferencia en dartmouth sobre inteligencia artificial.” WordPress, 1956. <https://darthmouthconference.wordpress.com/>.
- [95] B. Buitrago, “Modelos aprendizaje automático.” iWannaBeDataDriven, 2020. <https://medium.com/iwannabedatadriven/machine-learning-modelos-de-regresi%C3%B3n-i-d293ae235e9a>.
- [96] C. Molnar, “Aprendizaje automático interpretable: Modelos interpretables.” Bookdown, 2021. <https://fedefliguer.github.io/AAI/simple.html>.
- [97] R. C. Holte, *Very Simple Classification Rules Perform Well on Most Commonly Used Datasets*, vol. 11. Computer Science Department, University of Ottawa, Ottawa, Canada, 1993.
- [98] E. J. Chaves, “Distribución y coeficiente de gini, curva paramétrica de lorenz sugerida y calculos,” *Tendencias*, vol. 4, no. 2, p. 97–124, 2013. <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rtend/article/view/754>.
- [99] N. Tyagi, “Comprensión del índice de gini y la ganancia de información en los árboles de decisión.” AnalyticSteps, 2020. <https://medium.com/analytics-steps/understanding-the-gini-index-and-information-gain-in-decision-trees-ab4720518ba8>.
- [100] L. Breiman, “Bagging predictors,” *Machine Learning*, vol. 24, pp. 123–140, aug 1996.
- [101] R. Díaz, “Random forest, bagging y árboles de decisión.” themachinelearners.com, 2023. <https://www.themachinelearners.com/random-forest-python/#:~:text=La%20idea%20del%20algoritmo%20de,la%20media%20de%20las%20predicciones>.
- [102] Y. Freund and R. E. Schapire, “A decision-theoretic generalization of online learning and an application to boosting,” *Journal of Computer and System Sciences*, vol. 55, pp. 119–139, aug 1997.
- [103] F. Hernández, “Modelos predictivos.” Bookdown, 2023. [https://fhernanb.github.io/libro\\_mod\\_pred/adaboost.html](https://fhernanb.github.io/libro_mod_pred/adaboost.html).
- [104] L. Breiman, “Random forests.” Statistics Department University of California Berkeley, CA, 2001. <https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/randomforest2001.pdf>.

- 
- [105] F. Cardellino, “Tutorial para un clasificador basado en bosques aleatorios: cómo utilizar algoritmos basados en árboles para el aprendizaje automático.” freeCodeCamp, 2021. <https://www.freecodecamp.org/espanol/news/random-forest-classifier-tutorial-how-to-use-tree-based-algorithms-for-machine-learning/>.
- [106] L. Salcedo, “Introducción al machine learning: K vecinos más cercanos (clasificación y regresión),” 2020. <https://pythondiario.com/2018/01/introduccion-al-machine-learning-9-k.html>.
- [107] C. Martin, “Principal ventaja de naïve bayes.” Quora, 2022. <https://es.quora.com/Cu%C3%A1l-es-la-principal-ventaja-de-Naive-Bayes>.
- [108] J. M. Heras, “Máquinas de vectores de soporte (svm).” IArtificial-net, 2019. <https://www.iartificial.net/maquinas-de-vectores-de-soporte-svm/>.
- [109] J. M. Heras, “Regularización lasso l1, ridge l2 y elasticnet.” IArtificial-net, 2020. <https://www.iartificial.net/regularizacion-lasso-l1-ridge-l2-y-elasticnet/>.
- [110] L. Gonzalez, “Teoría: Regresión logística.” aprendeIA, 2023. <https://aprendeia.com/algoritmo-regresion-logistica-machine-learning-teoria/>.
- [111] P. D, P. L, and M. E, *Comparison of Neural Network applied to prediction of Time Series*, vol. 13. Prospect, 2015.
- [112] F. Alonso, “Redes neuronales y deep learning.” FutureSpace, 2023. <https://www.futurespace.es/redes-neuronales-y-deep-learning-capitulo-1-preludio/>.
- [113] H. A. Afan, A. I. A. Osman, Y. Essam, A. N. Ahmed, Y. F. Huang, O. Kisi, M. Sherif, A. Sefelnasr, K. wing Chau, and A. El-Shafie, “Modeling the fluctuations of groundwater level by employing ensemble deep learning techniques,” *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 15, pp. 1420–1439, jan 2021.
- [114] D. Broomhead and D. Lowe, *Multivariable Functional Interpolation and Adaptive Networks*, vol. 2. 1988. Capítulo 4: Función de Base Radial(Radial Basis Function (RBF)).
- [115] Y. Yang, P. Wang, and X. Gao, “A novel radial basis function neural network with high generalization performance for nonlinear process modelling,” *Processes*, vol. 10, no. 1, 2022. <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/1/140>.
- [116] G. Colmenares, *Redes Neuronales*. 2017. Capítulo 4: Función de Base Radial(Radial Basis Function (RBF)).

## BIBLIOGRAFIA

---

- [117] M. Ahmed, R. Seraj, and S. M. S. Islam, "The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation," *Electronics*, 2020.
- [118] R. Ceron, "Inteligencia artificial hoy: datos, entrenamiento e inferencias." IBM, 2019. <https://www.ibm.com/blogs/systems/mx-es/2019/12/inteligencia-artificial-hoy-datos-entrenamiento-e-inferencias/>.
- [119] R. R. José Luis, "Evaluación de modelos: Razonamiento asistido por computador," 2018. <https://www.cs.us.es/cursos/rac-2018/temas/tema-07.pdf>.
- [120] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and E. Duchesnay, "Scikit-learn: Machine learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.
- [121] Bookdown, "Árboles de decisión." bookdown, 2023. <https://bookdown.org/content/2031/ensambladores-random-forest-parte-i.html>.
- [122] T. Shin, "Comprensión de la matriz de confusión y cómo implementarla en python." DataSource.AI, 2020. <https://www.datasource.ai/es/data-science-articles/compression-de-la-matriz-de-confusion-y-como-implementarla-en-python>.
- [123] L. González, "La curva roc (característica de funcionamiento del receptor)." AprendeIA, 2023. <https://aprendeia.com/curvas-roc-y-area-bajo-la-curva-auc-machine-learning/>.
- [124] A. R. Ríos and A. M. P. Peña, "Estadística inferencial. elección de una prueba estadística no paramétrica en investigación científica," *Horizonte de la Ciencia*, vol. 10, may 2020.
- [125] Student, "The probable error of a mean," *Biometrika*, vol. 6, p. 1, mar 1908.
- [126] J. Dagnino, *Análisis de varianza*, vol. 43. Rev Chil Anest, 2014.
- [127] J. Dagnino, *Regresión lineal*, vol. 43. Rev Chil Anest, 2014.
- [128] C. Silva and M. Salinas, *Modelos de regresión y correlación / Regression and correlation models*, vol. 8(22). 2006.
- [129] F. Wilcoxon, "Individual comparisons by ranking methods," *Biometrics Bulletin*, vol. 1, p. 80, dec 1945.
- [130] S. García, A. Fernández, J. Luengo, and F. Herrera, "Advanced nonparametric tests for multiple comparisons in the design of experiments in computational intelligence and data mining: Experimental analysis of power," *Information Sciences*, vol. 180, pp. 2044–2064, may 2010.

- 
- [131] A. Benavoli, G. Corani, J. Demsar, and M. Zaffalon, "Time for a change: A tutorial for comparing multiple classifiers through bayesian analysis.," *Journal of Machine Learning Research*. 18., pp. 1–36, 2017.
- [132] J. K. Kruschke and T. M. Liddell, "The bayesian new statistics: Hypothesis testing, estimation, meta-analysis, and power analysis from a bayesian perspective," *Psychonomic Bulletin and Review*, vol. 25, pp. 178–206, feb 2017.
- [133] E. S. Lee and M. C. Joo, "Prevalence of autonomic dysreflexia in patients with spinal cord injury above t6," *BioMed Research International*, vol. 2017, pp. 1–6, 2017.
- [134] D. Wan and A. V. Krassioukov, "Life-threatening outcomes associated with autonomic dysreflexia: A clinical review," *The Journal of Spinal Cord Medicine*, vol. 37, pp. 2–10, nov 2013.
- [135] Asamblea Médica Mundial, "Principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos," 1964-2013. <https://web.archive.org/web/20170308101607/http://www.wma.net/es/30publications/10policies/b3/>.
- [136] A. Krassioukov, M. S. Alexander, A.-K. Karlsson, W. Donovan, C. J. Mathias, and F. Biering-Sørensen, "International spinal cord injury cardiovascular function basic data set," *Spinal Cord*, vol. 48, pp. 586–590, jan 2010.
- [137] JMP Statistical Discovery, "Prueba de independencia de ji cuadrado," 2023. [https://www.jmp.com/es\\_co/statistics-knowledge-portal/chi-square-test/chi-square-test-of-independence.html#:~:text=La%20prueba%20de%20independencia%20ji%20cuadrado%20comprueba%20si%20es%20probable,noci%C3%B3n%20es%20plausible%20o%20no](https://www.jmp.com/es_co/statistics-knowledge-portal/chi-square-test/chi-square-test-of-independence.html#:~:text=La%20prueba%20de%20independencia%20ji%20cuadrado%20comprueba%20si%20es%20probable,noci%C3%B3n%20es%20plausible%20o%20no).
- [138] Bookdown, "Prueba u de mann whitney." bookdown, 2023. <https://bookdown.org/dietrichson/metodos-cuantitativos/prueba-u-de-mann-whitney.html>.
- [139] R. Martínez, L. Tuya, M. Martínez, A. Pérez, and A. Cánovas, "El Coeficiente de Correlación de los rangos de Spearman," *Revista Habanera de Ciencias*, vol. 8, 2009. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1729-519X2009000200017&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017&nrm=iso).
- [140] Wikipedia, "SPSS: IBM Corp.," Wikipedia, 2023. <https://es.wikipedia.org/wiki/SPSS>.
- [141] S. Suresh and B. S. Duerstock, "Automated detection of symptomatic autonomic dysreflexia through multimodal sensing," *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, vol. 8, pp. 1–8, 2020.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [142] S. Suresh and B. S. Duerstock, “Optimal feature selection for the detection of autonomic dysreflexia in individuals with tetraplegia,” in *2018 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, IEEE, dec 2018.
- [143] N. Sagastibeltza, A. Salazar-Ramirez, A. Yera, R. Martinez, J. Muguerza, N. CivicosSanchez, and M. A. Gil, “A hierarchical machine learning solution for the non-invasive diagnostic of autonomic dysreflexia,” *Electronics*, vol. 11, p. 584, 2022.
- [144] American Spinal Injury Association – ASIA, “Standards for Neurological Classification of SCI..” Worksheet, 2019. [https://asia-spinalinjury.org/wp-content/uploads/2019/10/ASIA-ISCOS-Worksheet\\_10.2019\\_PRINT-Page-1-2.pdf](https://asia-spinalinjury.org/wp-content/uploads/2019/10/ASIA-ISCOS-Worksheet_10.2019_PRINT-Page-1-2.pdf).
- [145] I. H. Witten and E. Frank, “Data mining: Practical machine learning tools and techniques.” Morgan Kaufmann, Burlington (MA), 2016.
- [146] World Health Organization, “Preamble to the constitution of the world health organization,” 1948. <https://apps.who.int/gb/bd/PDF/bd47/EN/constitution-en.pdf?ua=1>.
- [147] A. U. M, O. H. B, and A. Caqueo-Urizar, “Salud mental y estrés por aculturación en inmigrantes sudamericanos en el norte de chile,” *Revista médica de Chile*, vol. 144, pp. 563–570, may 2016.
- [148] R. G. del Amo and E. Guerrero-Barona, “Factores de riesgo psicosocial, estrés percibido y salud mental en el profesorado,” *Clínica Contemporánea*, vol. 9, no. 1, pp. E2, 1–12, 2018.
- [149] P. Schönfeld, J. Brailovskaia, A. Bieda, X. C. Zhang, and J. Margraf, “The effects of daily stress on positive and negative mental health: Mediation through self-efficacy,” *International Journal of Clinical and Health Psychology*, vol. 16, pp. 1–10, jan 2016.
- [150] W. H. Organization, “Mental health and psychosocial considerations during the covid-19 outbreak, 18 march 2020,” technical documents, 2020. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/331490>.
- [151] Y.-T. Xiang, Y. Yang, W. Li, L. Zhang, Q. Zhang, T. Cheung, and C. H. Ng, “Timely mental health care for the 2019 novel coronavirus outbreak is urgently needed,” *The Lancet Psychiatry*, vol. 7, pp. 228–229, mar 2020.
- [152] A. A. Al-Jumaily, N. Matin, and A. N. Hoshyar, “Machine learning based biosignals mental stress detection,” in *Communications in Computer and Information Science*, pp. 28–41, Springer Singapore, 2021.
- [153] S. Aristizabal, K. Byun, N. Wood, A. F. Mullan, P. M. Porter, C. Campanella, A. Jamrozik, I. Z. Nenadic, and B. A. Bauer, “The feasibility of wearable and self-report stress detection measures in a semi-controlled lab environment,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 102053–102068, 2021.

- 
- [154] J. Chen, M. Abbod, and J.-S. Shieh, "Pain and stress detection using wearable sensors and devices—a review," *Sensors*, vol. 21, p. 1030, feb 2021.
- [155] R. Martinez, E. Irigoyen, A. Arruti, J. Martin, and J. Muguerza, "A real-time stress classification system based on arousal analysis of the nervous system by an f-state machine," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 148, pp. 81–90, sep 2017.
- [156] R. Martinez, A. Salazar-Ramirez, A. Arruti, E. Irigoyen, J. I. Martin, and J. Muguerza, "A self-paced relaxation response detection system based on galvanic skin response analysis," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 43730–43741, 2019.
- [157] A.-S. Bertrand, A. Iannessi, S. Buteau, X.-Y. Jiang, H. Beaumont, B. Grondin, and G. Baudin, "Effects of relaxing therapies on patient's pain during percutaneous interventional radiology procedures," *Annals of Palliative Medicine*, 2018. <https://apm.amegroups.com/article/view/20436>.
- [158] T. Pérez, B. Tijero, I. Gabilondo, A. Luna, V. Llorens, K. Berganzo, M. Acera, A. Gonzalez, A. Sanchez-Ferro, E. Lezcano, J. J. Zarranz, and J. C. Gómez-Esteban, "Cardiocirculatory manifestations in parkinson's disease patients without orthostatic hypotension," *Journal of Human Hypertension*, vol. 29, pp. 604–609, jan 2015.
- [159] J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, and G. G. Berntson, *Handbook of Psychophysiology*. Cambridge University Press, 3 ed., 2007.
- [160] B. B. Pope, "How to perform 3 or 5 lead monitoring," *Nursing*, vol. 32, no. 4, pp. 50–52, 2002. <https://doi.org/10.1097/00152193-200204000-00038>.
- [161] M. Choi, G. Koo, M. Seo, and S. W. Kim, "Wearable device-based system to monitor a driver's stress, fatigue, and drowsiness," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, pp. 634–645, mar 2018.
- [162] C. Setz, B. Arnrich, J. Schumm, R. L. Marca, G. Troster, and U. Ehlert, "Discriminating stress from cognitive load using a wearable EDA device," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 14, pp. 410–417, mar 2010.
- [163] L. lan Chen, Y. Zhao, P. fei Ye, J. Zhang, and J. zhong Zou, "Detecting driving stress in physiological signals based on multimodal feature analysis and kernel classifiers," *Expert Systems with Applications*, vol. 85, pp. 279–291, nov 2017.
- [164] P. Bota, C. Wang, A. Fred, and H. Silva, "Emotion assessment using feature fusion and decision fusion classification based on physiological data: Are we there yet?," *Sensors*, vol. 20, p. 4723, aug 2020.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [165] M. Vanny, S.-M. Park, K.-E. Ko, and K.-B. Sim, “Analysis of physiological signals for emotion recognition based on support vector machine,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 115–125, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [166] J. Kim and E. Andre, “Emotion recognition based on physiological changes in music listening,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, pp. 2067–2083, dec 2008.
- [167] Y. Hu, C. Converse, M. Lyons, and W. Hsu, “Neural control of sweat secretion: a review,” *British Journal of Dermatology*, vol. 178, pp. 1246–1256, apr 2018.
- [168] W. B. Cannon, *Bodily changes in pain, hunger, fear and rage: An account of recent researches into the function of emotional excitement*. D Appleton & Company, 1915.
- [169] S. Pourmohammadi and A. Maleki, “Stress detection using ECG and EMG signals: A comprehensive study,” *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 193, p. 105482, sep 2020.
- [170] W. D. Scherz, R. Seepold, N. M. Madrid, P. Crippa, and J. A. Ortega, “RR interval analysis for the distinction between stress, physical activity and no activity using a portable ECG,” in *2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, IEEE, jul 2020.
- [171] A. Léonard, S. Clément, C.-D. Kuo, and M. Manto, “Changes in heart rate variability during heartfulness meditation: A power spectral analysis including the residual spectrum,” *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, vol. 6, may 2019.
- [172] H. Alawieh, Z. Dawy, E. Yaacoub, N. Abbas, and J. El-Imad, “A real-time ECG feature extraction algorithm for detecting meditation levels within a general measurement setup,” in *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, IEEE, jul 2019.
- [173] A. de Santos Sierra, C. S. Avila, J. G. Casanova, and G. B. del Pozo, “A stress-detection system based on physiological signals and fuzzy logic,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 4857–4865, oct 2011.
- [174] J. Healey and R. Picard, “Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 6, pp. 156–166, jun 2005.
- [175] M. Saidi, H. Hassanpoor, and A. A. Lari, “Proposed new signal for real-time stress monitoring: Combination of physiological measures,” *Amirkabir International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2016.



- 
- [176] M. Merino, I. Gómez, A. J. Molina, and K. Guzman, “Assessment of biosignals for managing a virtual keyboard,” in *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 331–337, Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [177] A. Greco, G. Valenza, and E. P. Scilingo, “Modeling for the analysis of the EDA,” in *Advances in Electrodermal Activity Processing with Applications for Mental Health*, pp. 19–33, Springer International Publishing, 2016.
- [178] A. H. Khandoker, C. Karmakar, M. Brennan, M. Palaniswami, and A. Voss, *Poincaré Plot Methods for Heart Rate Variability Analysis*. Springer US, 2013.
- [179] L. C. M. Vanderlei, C. M. Pastre, I. F. F. Júnior, and M. F. de Godoy, “Índices geométricos de variabilidade da frequência cardíaca em crianças obesas e eutróficas,” *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, vol. 95, pp. 35–40, jul 2010.
- [180] C. Goutte and E. Gaussier, “A probabilistic interpretation of precision, recall and f-score, with implication for evaluation,” in *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 345–359, Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [181] M. A. Hall, “Correlation-based feature selection for discrete and numeric class machine learning.” Morgan Kaufmann, Burlington (MA), 2000.
- [182] P. Schmidt, A. Reiss, R. Duerichen, C. Marberger, and K. V. Laerhoven, “Introducing WESAD, a multimodal dataset for wearable stress and affect detection,” in *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction*, ACM, oct 2018.
- [183] J. R. Krygier, J. A. Heathers, S. Shahrestani, M. Abbott, J. J. Gross, and A. H. Kemp, “Mindfulness meditation, well-being, and heart rate variability: A preliminary investigation into the impact of intensive vipassana meditation,” *International Journal of Psychophysiology*, vol. 89, pp. 305–313, sep 2013.
- [184] R. Li, L. Li, and S. Xue, “The effect of short-term mindfulness training on the emotional state of college students with different levels of mindfulness: Evidence from neurophysiological signals,” *Open Journal of Social Sciences*, vol. 09, no. 05, pp. 570–580, 2021.
- [185] S. Sicard, “Cancer et sophrologie,” *Psycho-Oncologie*, vol. 3, pp. 184–187, sep 2009.
- [186] S. A. Gao, A. Ambring, G. Lambert, and A.-K. Karlsson, “Autonomic control of the heart and renal vascular bed during autonomic dysreflexia in high spinal cord injury,” *Clinical Autonomic Research*, vol. 12, pp. 457–464, dec 2002.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [187] H. Krum, D. J. Brown, P. R. Rowe, W. J. Louis, and L. G. Howes, "Steady state plasma 3honoradrenaline kinetics in quadriplegic chronic spinal cord injury patients," *Journal of Autonomic Pharmacology*, vol. 10, pp. 221–226, aug 1990.
- [188] A. Roozbehi, M. Joghataei, M. Bakhtiyari, J. Mohammadi, P. Rad, and H. Delaviz, "Age-associated changes on axonal regeneration and functional outcome after spinal cord injury in rats," *Acta Med Iran*, 2015.