



## Fjölbreytnistuðlar og vísitægi við vöktun

Þorleifur Eiríksson og Guðmundur Vídir Helgason

### Inngangur

Mikilvægt er að fylgjast með mengun, af hvaða toga sem hún er, svo hægt sé að tryggja að mengun verði ekki meiri en ásætlanlegt er.

Mengun af völdum ákveðinna efna svo sem þungmálma er hægt að mæla með beinum hætti og síðan meta þá þætti sem verða fyrir eituráhrifum. Helsta vandamálið er að uppruni hinna mengandi efna er oft ekki augljós og stundum af náttúrlegum orsökum. Þannig er kadmíum- mengun tiltölulega algeng í fjörðum á Íslandi og oftast til af náttúrlegum orsökum.

Lífræn mengun getur verið enn erfiðari þar sem lífræn efni eru allstaðar í náttúrunni og ekki ástæða til að skilgreina lífræn efni sem mengun fyrir en þau hafa náð því magni að þau hafa veruleg áhrif á lífríkið. Þetta gerist helst á svæðum þar sem lífræn efni safnast upp og því er oft talað um uppsöfnun lífrænna efna.

Lífræn efni upp að ákveðnu marki eru fæða eða áburður í lífkerfum og nauðsynleg til að viðhalda ákveðnum samfélögum eða samfélagsgerðum. Aukist magnið eykst vöxtur án þess að samfélagsgerðin breytist

og lífrænu efnin hlaðast ekki upp. Við aukið álag fer uppsöfnunin að valda breytingum á gerð samfélaga.

Margar aðferðir eru notaðar til að fylgjast með breytingum á samfélögum, en þeir aðferðaflokkar, sem gefist hafa vel, eru t.d. fjölbreytnistuðlar, skyldleikastuðlar og vísitægi.

### Fjölbreytnistuðlar

Algengasti mælikvarðinn á fjölbreytni samfélaga er fjöldi tegunda eða tegundaauði (e. Species richness). En þar sem fjöldi einstaklinga er svo mismunandi og ein tegund getur verið algjörlega ráðandi getur þetta verið mjög villandi mælikvarði.

Fjölbreytnistuðlar eru mikið notaðir í umfjöllun um samfélög og sá sem er einna mest notaður er Shannon fjölbreytnistuðullinn, sem er stundum kallaður Shannon–Wiener stuðull eða jafnvel Shannon–Weaver stuðull. Ástæðurnar á þessum mismunandi heitum eru sögulegar og má rekja til þess hvernig þessi stuðull var birtur upphaflega (Spellerberg og Fedor 2003). Algengast er nú orðið að tala um Shannon fjölbreytnistuðul, eða

einfaldlega fjölbreytileikastuðul (Magurran 1988).

Með Shannon fjölbreytnistuðlinum er metið hversu margar tegundir eru til staðar hverju sinni og hvernig einstaklingarnir dreifast milli tegunda.

### Shannon fjölbreytnistuðullinn $H'$ :

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$$

þar sem:  $S$  = fjöldi tegunda og  $p_i$  = hlutdeild af heildarsýni, sem tilheyrir tegund  $i$ . Þessi stuðull hækkar eftir því sem fjölbreytni eykst og er stuðullinn hæstur ( $H'$  max) þegar fjöldi einstaklinga er sá sami hjá öllum tegundum.

$$H'_{max} = - \sum_{i=1}^S \frac{1}{S} \log_2 \frac{1}{S} = \log_2 S$$

Einsleitnustuðullinn  $J'$ , er nátengdur Shannon fjölbreytnistuðlinum, en sýnir hvort jafnræði er milli tegunda, eða hvort ein eða fáar tegundir eru sérstaklega áberandi. Stuðullinn getur mest orðið 1 en lækkar þegar jafnræði lækkar.

Einsleitnustuðullinn  $J'$

$$J' = \frac{H'}{H'_{max}}$$

Þessir tveir stuðlar; Shannon fjölbreytnistuðullinn  $H'$  og einsleitnustuðullinn  $J'$ , eru oft notaðir saman til að meta breytingar á samfélögum og séu þeir skoðaðir ásamt skiptingu tegunda í hópa, svo sem ættir, gefur það mynd af samfélaginu sem hentar vel til að greina breytingar.

Eftirfrandi dæmi sem sýnt er á myndum 1-3 er úr rannsóknum á fjölbreytni botndýrasamfélaga í Ísafjarðardjúpi og sýnir samspil fjölbreytnistuðla. Í rannsókninni voru teknar greipar af botninum á mismunandi söfnunarstöðvum. Dýrin í þeim voru greind til tegundar eða hópa og þau talin (Þorleifur Eiríksson o.fl. 2016).

Myndir 1-3 sýna niðurstöður út frá fjórum greipum sem teknar eru á mismunandi stöðvum sem allar voru nálægt fiskeldiskvíum. Tvær greipanna (stöðvar 15a-b) eru teknar áður en fiskeldi hefst en hinar tvær (stöðvar 17-18) eftir að fiskeldi hafði verið á stöðvunum um nokkurn tíma. Mynd 1 sýnir skiptingu dýra í helstu hópa. Mynd 2 sýnir Shannon fjölbreytnistuðla á hverri

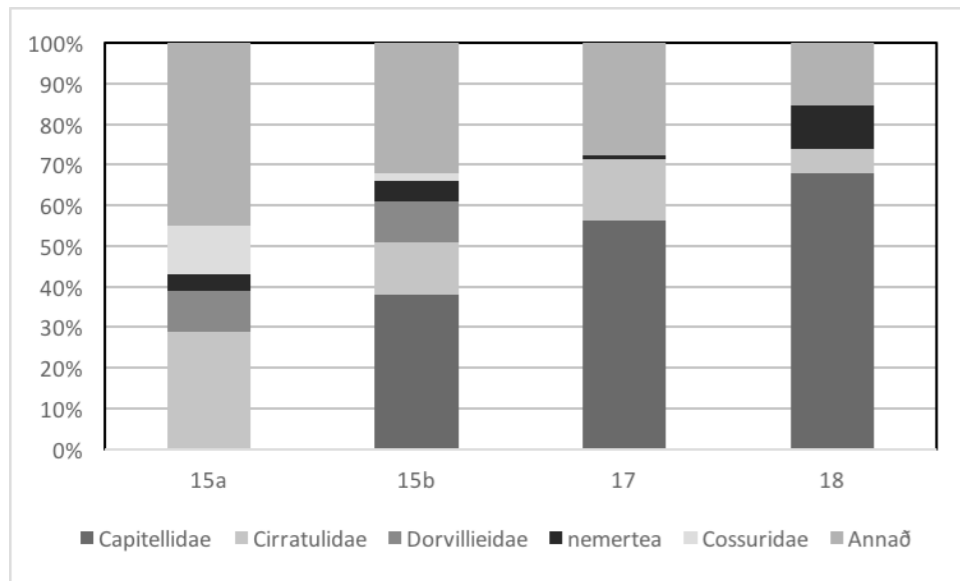
stöð og mynd 3 sýnir einsleitnustuðullinn  $J'$  á sömu stöðvum. Hóparnir, sem eru sýndir, eru algengir í botndýrasamfélögum og eru annars vegar fimm ættir burstaorma (Polychaeta) og fylkingin ranaormar (Nemertea).

Á mynd 1 sést að burstaormum af ættinni Capitellidae hefur fjölgað mikið á þeim stöðvum sem fiskeldi hefur verið stundað (stöðvum 17-18) og tegundum af öðrum hópum fækkað tilsvareandi, s.s. Dorvillidae sem er alveg horfin og Cossuridae sem hefur minnkað verulega. Eins og sést á myndum 2 og 3 er samræmi á milli Shannon fjölbreytnistuðulsins  $H'$  og einsleitnustuðulsins  $J'$ , en þeir draga fram mismunandi atriði í samfélögum og báðir stuðlarnir endurspeglar skipunina í hópa sem er sýnd á mynd 1. Það er að fjölbreytni minnkar við fiskeldi (stöðvar 17-18) og einsleitnustuðull minnkar þegar einum hóp fjölga verulega (stöð 18) en á stöð 17 þá helst einsleitnin enn há þrátt fyrir að fjölbreytnin minnki. Þessir stuðlar eru nátengdir en sýna ekki alltaf það sama og því ástæða til að skoða báða.

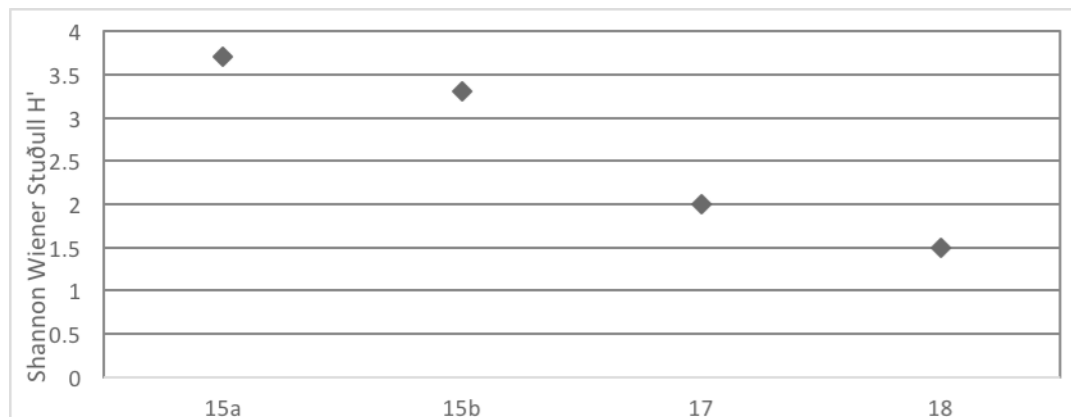
Mat á áhrifum er grundvallatriði í umhverfisstjórnun og vistfræðilegir matstuðlar eru verkfæri mikið notuð í þeim tilgangi. Fjölbreytnistuðlar eins og Shannon fjölbreytnistuðullinn voru venjulega notaðir til að meta þessi áhrif, en síðan hafa verið þróaðir líffræðistuðlar; AMBI (AZTI's Marine Biotic Index) og M-AMBI (Multivariate AMBI), sem hafa verið notaðir sem vísar á umhverfisáhrif manna. AZTI er nafnið á Háskólanum þar sem þessi líffræðistuðull þróaður.

Munur á þessum stuðlum er að Shannon fjölbreytnistuðullinn er byggður á fjölbreytni innan samfélagsins en AMBI stuðullinn er byggður á vistfræðilegri flokkun. M-AMBI er svo eins og nafnið bendir til (Multivariate AMBI eða margflokka AMBI), byggður á sameiningu þessara þátta.

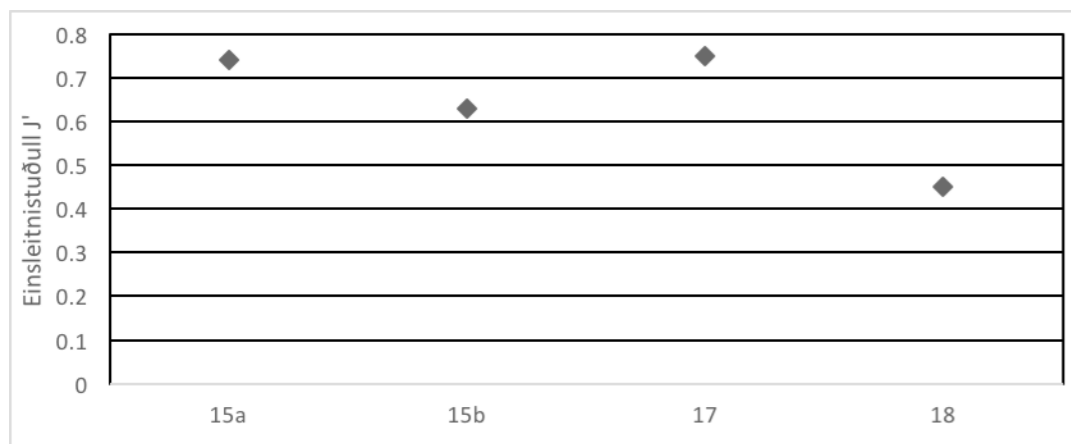
Shannon fjölbreytileikastuðullinn er í eðli sínu tölfræðilegur stuðull sem byggir á fjölda tegunda og hluta einstaklinga tegunda en þar með er stuðullinn afstæður og nauðsynlegt að hafa viðmiðun til að segja hvað gildið þýðir vistfræðilega. Til að nota Shannon til að meta truflun, m.a. mengun, er því nauðsynlegt að vera með viðmiðunarstöðvar þar sem vitað er að engin truflun hefur orðið. Þetta getur leitt til vandamála við notkun Shannon fjölbreytnistuðulsins. Shannon virkar því við margskonar aðstæður séu réttar viðmiðunarstöðvar notaðar og virkar vel á milli stöðva innan sama kerfis, t.d. sami staður á mismunandi tímum sem er mjög mikilvægt í vöktun (Magurran 1988). Tölugildi fjölbreytnistuðulsins verða normaldreifð ef þau eru reiknuð fyrir mörg sýni sem þýðir að hægt er að nota öflug tölfræði- próf s.s. fervikagreiningu.



Mynd 1: Skipting botndýra af mismunandi söfnunarstöðvum í meginhópa; Capitellidae, Cirratulidae, Dorvillieidae, Nemertea, Cossuridae og Annað, sem eru margir mismunandi hópar með færri einstaklingum en áður nefndir hópar.



Mynd 2: Shannon fjölbreytnistuðullinn á sömu stöðvum og sýndar eru á mynd 1.



Mynd 3: Einsleitnistuðullinn J' á sömu stöðvum og sýndar eru á mynd 1 og mynd 2.

AMBI stuðullinn er byggður á vistfræðilegum hópum og gerir ráð fyrir mikilli þekkingu á einstökum tegundum. AMBI stuðullinn er ekki afstæður og er því hægt að nota hann án viðmiðunar og er því ákveðinn kostur fram yfir Shannon. Til að reikna út AMBI þarf enga stöð til viðmiðunar. Það þarf hinsvegar aðgang að sameiginlegum gagnagrunni um tegundir og því miður eru ekki allar tegundir þar og það á sérstaklega við um jaðarsvæði eins og Ísland. Það hefur komið í ljós að við „óvenjulegar“ aðstæður, s.s. í árósum þar sem er lítil selta, er AMBI stuðullinn óreiðanlegur. Reynt hefur verið að komast fram hjá þessum vandamálum með því að skilgreina sérstakar landnemattegundir (e. Pioneer).

Vegna þessara kosta og galla hefur verið þróuð sameinuð útgáfa M-AMBI (margþáta AMBI) sem byggist á AMBI stuðlinum, tegundaauðgi og Shannon stuðlinum. Þessi stuðull hefur marga kosti AMBI en einnig Shannon og allir þessir stuðlar sýna sambærilegar niðurstöður ef þeir eru notaðir við sömu aðstæður.

Hér á landi voru þessir stuðlar (AMBI og M-AMBI) notaðir í fyrsta skipti í rannsókn sem vísar á áhrif manna á umhverfisástand Pollsins í Skutulsfirði. Botndýrasamfélög voru rannsökuð til að svara hvort umhverfisástand Pollsins hafi breyst milli sýnatökúára.

Sýni höfðu verið tekin árið 1997 (Anton Helgason o.fl. 2001) og til að svara þessari spurningu var sýnataka endurtekin 2010 (Gharibi 2011). Matstuðlar, sem voru notaðir gáfu, svipaða niðurstöðu um umhverfisástand og var ástand mismunandi sýnatökustöðva flokkað sem meðalgott eða gott.

### Skyldleikastuðlar

Við skoðun á samfélögum eru skyldleikastuðlar oft notaðir, t.d. er Bray-Curtis skyldleikastuðullinn mikið notaður, en hann er þéttleikaháður skyldleikastuðull, eða magnbundni Sørensen skyldleikastuðullinn. Niðurstöðurnar eru oft settar fram sem hríslumynd (dentrogram) þar sem skyldleikinn er táknaður í prósentum. (Magurran & Brian, 2011).

Með skyldleikastuðlum er lagt mat á hversu lík dreifing einstaklinga af hverri tegund er á milli svæða. Vísitalan er frá 0–100% og hærri tölur þýða aukinn skyldleika. Skyldleika á milli einstakra svæða er síðan hægt að lesa út úr töflu. Gerð var klasagreining sem raðar líkum hópum saman og sýnir hve mikill skyldleiki (%) er á milli einstakra hópa.

Skyldleikastuðlar hafa gefist vel til að lýsa botndýrasamfélögum í Ísafjarðardjúpi og jafnframt breytingum á samfélögum sem hægt er að rekja til sérstakra áhrifa. Þannig hefur verið hægt að nota skyldleikagreiningu til að flokka saman stöðvar sem orðið

hafa fyrir áhrifum frá fiskeldi, og aðskilja þær frá þeim sem ekki hafa orðið fyrir áhrifum. En taka verður tillit til þess að stöðvar hafa orðið fyrir ýmsum öðrum áhrifum svo ekki flokkast allt einfaldlega í þessa tvo flokka.

Niðurstöður skyldleikagreiningar eru sýndar á MDS korti (mynd 4) þar sem stöðvar innan hrings B, sem orðið hafa fyrir áhrifum, eru flokkaðar saman, og borið saman við stöðvar sem ekki hafa orðið fyrir áhrifum innan hrings A, en utan hringjanna eru stöðvar sem ekki falla innan þessa flokka. (Þorleifur Eiríksson o.fl. 2012). Á mynd 4 sést að stöðvarnar skiptast í tvær megin botndýrasamfélagsgerðir (A og B) en stöðvar þar á milli tengjast innbyrðis og við stöðvar úr öðrum eða báðum samfélagsgerðum. Í samfélagsgerð B eru einungis tvær stöðvar en þær eru teknar á mismunandi tíma. Stöð G í Seyðisfirði (sey G) sýnir skyldleika við stöðvarnar sem eru teknar í nóvember 2006 og í mars 2009 í samfélagsgerð B.

Dýrafjörður á norðanverðum Vestfjörðum var þverður árið 1991. Árið 1985, eða nokkru áður en framkvæmdir hófust, voru gerðar þar umfangsmiklar vistfræðirannsóknir, meðal annars á hryggleysingjum í leirum, fjörum (Agnar Ingólfsson 1986) og á botni fjarðarins (Jörundur Svavarsson og Arnþór Garðarsson 1986). Þessar rannsóknir voru endurteknar á árunum 2006–2007 með sömu aðferðum og notaðar voru í fyrri rannsóknum (Þorleifur Eiríksson o.fl. 2015). Hér eru niðurstöður þessara tveggja rannsóknatímabila bornar saman.

Birt eru meðaltöl um fjölda einstaklinga af ákveðnum tegundum eða dýrahópum af fjörusniðum og botnsvæðum og borin saman við tölur af samsvarandi svæðum í fyrri rannsóknum. Jafnframt er reiknuð fjölbreytni á mismunandi svæðum og skyldleiki samfélaga á svæðunum, bæði innan sömu rannsóknar og á milli rannsókna.

Niðurstöður þessara tveggja rannsókna, sem gerðar voru með 21–22 ára millibili, eru mjög líkar. Það er 46–57% skyldleiki milli sömu svæða á botni 1985 og 2006. Skyldleiki sömu sniða á leirum á milli rannsókna er 42,3% og 52%. Í fjörinni er skyldleikinn á bilinu 62–66%.

### Vísitengundir

Það er mjög misjafnt hvernig tegundir dýra bregðast við uppsöfnun lífrænna efna. Sumar tegundir eru mjög viðkvæmar fyrir auknu magni lífrænna leifa í umhverfinu og hverfa, á meðan aðrar virðast ekki verða fyrir áhrifum og sumar þrífast greinilega betur og fjölga oft verulega.

Þegar öðrum tegundum fækkar aukast lífræna leifarnar jafnvel enn meira hlutfallslega og vöxtur

tegunda sem þrífast við þannig aðstæður.

Þetta mismunandi þol við miklu magni lífrænna efna eða þessi mismunandi viðbrögð tegunda er hægt að nýta sér við mat á þessari tegund af mengun. Mikill fjöldi ákveðinnar tegundar eða tegunda og fjarvera annarra bendir til mengunar. Þessar tegundir vísa til mengunar og eru því kallaðar vísitægundir (e. indicator species).

Gott dæmi um vísitægund er burstaormurinn *Capitella capitata* (Capitellidae), eins og sést á Mynd 1 sem sýnir fjölgun Capitellidae á stöðvum þar sem fiskeldi hefur verið stundað. Þessi tegund er algeng í leirum, fjörum og á grunnsævi umhverfis landið en þegar lífrænnar mengunar gætir að ráði fjölgar henni gríðarlega jafnframt sem öðrum tegundum fækkar. Tegundinni var lýst frá Vestur-Grænlandi af danska trúboðanum Otto Fabricius árið 1780 en hefur síðan verið getið frá öllum heimshornum. Hér mun þó ekki vera um eina tegund að ræða heldur hóp a.m.k. 15 náskyldra tegunda sem ekki er auðvelt að greina á milli á hefðbundinn hátt.

Þessar tegundir eru allar með mjög stutt kynslóðabil. Frá því að lifra klekst til kynþroska er talið taka um 4 mánuði í náttúrunni en um einn og hálfan mánuð í tilraunastofu. Hvert kvendýr getur orpið um 1000 eggjum sem þau ala í slímrörum sínum. Talið er að hjá flestum tegundum fari lifurnar ekki upp í svífið nema kannski í nokkra klukkutíma en þó þekkt sumstaðar í allt að viku. Það er einnig þekkt að oft,

sérstaklega þegar kynjahlutfall er skekkkt, að a.m.k. karldýrin þrói með sér tvíkynjun. Tegundinni getur því fjölgað gríðarlega á stuttum tíma við hagstæð skilyrði eins og til dæmis þegar lífrænnar mengunar gætir. Tegundin er einnig mjög þolin fyrir ýmsum erfiðum umhverfisaðstæðum eins og súrefnisskortri sem oft gætir þegar um mikla lífræna mengun er að ræða. Tegundin verður þá oft því sem næst einráða á svæðinu, en um leið étur hún upp mengunina og undirbýr því svæðið fyrir aðrar tegundir sem útrýma henni þegar ástandið verður eðlilegra.

Eins og fram hefur komið eru fjölbreytni- og skyldleikastuðlar góð aðferð til að fylgjast með hvernig samfélög breytast og þannig er gott að nota þá til að vakta mengun eða annars konar áreiti á umhverfið og þannig dýrasamfélögin. Til þess að fylgjast með breytingum á samfélögum á þennan hátt þarf að skoða breytingar meðal fjöldamargra tegunda eða hópa. Það væri mun þægilegra og ódýrara að þurfa bara að skoða hlutfallslegan fjölda valdra tegunda, svokallaðar vísitægundir, og fá þannig hugmynd um hvernig ástand vistkerfisins væri að breytast.



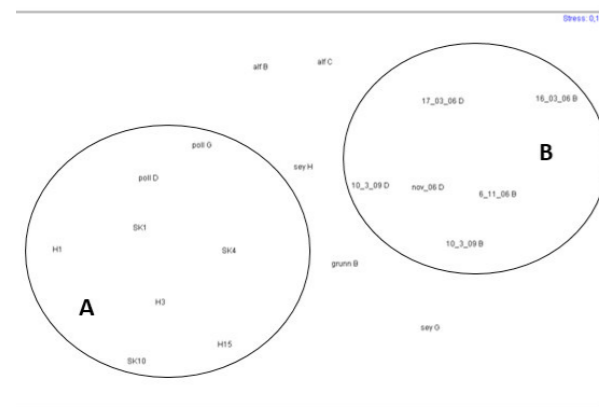
## Fjórdungi bregður til nafns: af uppnefndum genum og sérvisku erfðafræðinga

Arnar Pálsson

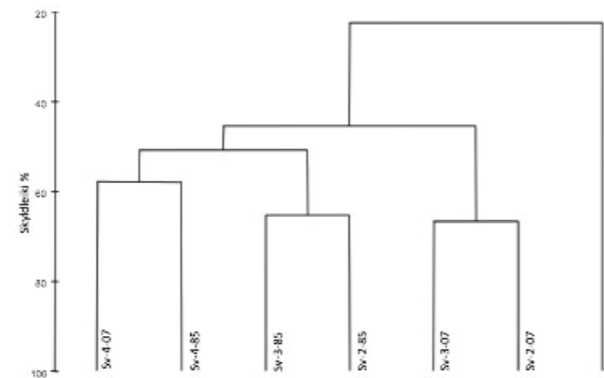
„Þú skalt heita Skuld“ sagði erfðafræðingurinn. Flugugreyið er forviða. Hún fæddist í ljómandi finni túbu með systkinum sínum, þar sem hiti er jafn og notalegur, engir afræningjar og næg fæða. Hún veit ekki að hún er leiksoppur örlagavalda, sem kallast James Kennison og John Tamkun. Því síður að þeir voru ekki að nefna hana sjálfa, heldur gen sem hafði áhrif á þroskun (eins og skuld). Þeir einangruðu slatta af genum og höfðu greinilega lesið norræna goðafræði, því þrjú þeirra voru skírð Urður (urd), verthandi (vtd) og skuld (skd). Örlaganornirnar Urður, Verðandi og Skuld spunnu þræði sem ákvörðuðu örlög manna. Á sama hátt tengjast þessi gen örlögum fruma í þroskun ávaxtaflugna.

Erfðafræðingar rannsaka lögmál erfða og kortleggja gen. Þegar gen finnast er til síðs að gefa þeim nöfn, til að einfalda framsetningu og umræður. Vinnunúmer (t.d. CG10079) geta átt við athyglisverð gen. En um leið og þú veist að CG10079 heitir Egfr getur þú tengt það við þekkingu þína af frumunni. EGF stendur

fyrir epidermal growth factor, sem er boðsameind sem frumur nota í samskiptum. Egfr er viðtakinn fyrir þessa boðsameind, sem gerir frumum kleift að skynja hana og bregðast við. En nöfn genanna erum mörg og margvísleg. Altítt er að erfðafræðingar gefi genum nöfn út frá svipgerð eða galla sem fram kemur þegar gen stökkbreytist. T.d. skírði Thomas Morgan fyrsta genið sitt white vegna þess að augu flugunnar sem venjulega eru rauð urðu hvít. Gen uppgötvast oft sem athyglisvert frávik í svipfari, sem erfist. Þannig fundust til dæmis stökkbrigðin Torpedo, sem veldur því að fóstur ávaxtaflugna verður eins og tundurskeyti, faint little ball, sem breytir því í óásjálægan hnoðra og Ellipse sem gerir augu flugunnar sporöskjulaga. Erfðafræðingar sem rannsaka ólíka þætti lífverunnar geta fundið ólíka galla í sama geni, mismunandi samsætur eða allel. Torpedo, faint little ball og Ellipse eru t.d. ólíkar samsætur Egfr gens ávaxtaflugunnar. Það sýnir okkur sértæk áhrif ólíkra stökkbreytinga í sama geni og einnig hversu oft sum gen



Mynd 4: MDS kort. Afstæð fjarlægð stöðva (tafla 5) með tilliti til flokkun botndýra í ættir.



Mynd 5: Skyldleiki í % á milli svæða á botni (Svæði 1–4 frá 2007 og 2–4 frá 1985).